

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Bruno Goulart Mondini**

**AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE DE CONCRETOS UTILIZANDO  
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO SUBMETIDOS AO  
PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR JIGAGEM A SECO**

Porto Alegre  
julho 2018

BRUNO GOULART MONDINI

**AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE DE CONCRETOS  
UTILIZANDO RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E  
DEMOLIÇÃO SUBMETIDOS AO PROCESSO DE  
SEPARAÇÃO POR JIGAGEM A SECO**

Trabalho de Diplomação apresentado à Comissão do Curso de  
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheiro Civil

**Orientadora: Angela Borges Masuero**  
**Orientadora: Denise Carpena Coitinho Dal Molin**

Porto Alegre  
julho 2018

BRUNO GOULART MONDINI

**AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE DE CONCRETOS  
UTILIZANDO RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E  
DEMOLIÇÃO SUBMETIDOS AO PROCESSO DE JIGAGEM A  
SECO**

Porto Alegre, julho de 2018

Profa. Angela Borges Masuero  
Dra. pela UFRGS

Profa. Denise Carpena Coitinho dal Molin  
Dra. pela USP

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa. Angela Borges Masuero**  
**(UFRGS)**  
Dra. pela UFRGS

**Profa. Denise Carpena Coitinho dal Molin**  
**(UFRGS)**  
Dra. pela USP

**Profa. Rejane Maria Candiota Tubino**  
**(UFRGS)**  
Dra. pela UFRGS

**Prof. Weslei Monteiro Ambrós**  
**(UFRGS)**  
Dr. pela UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais, Ivo e Lúdia, que sempre me apoiaram e, especialmente durante o período do meu curso de graduação, estiveram ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Meus sinceros agradecimentos às minhas queridas orientadoras Angela Masuero e Denise Dal Molin, que sempre tiveram a paciência para me ensinar sobre todos os conteúdos nessa graduação e, principalmente, nesta pesquisa.

Aos meus pais, Ivo e Lúdia, que nunca mediram esforços para me apoiar nesses anos de faculdade e foram responsáveis por tornar todas as dificuldades mais fáceis de serem enfrentadas. Aos meus irmãos, Mariana e Pedro, e demais familiares, meu muito obrigado.

À minha namorada, Alice, que teve paciência e compreensão nessa etapa final da graduação, me apoiando e incentivando a enfrentar todas as adversidades.

Aos irmãos que a faculdade me deu, Barletta, Bomber, Fritz, Goldoni, Jhonny, Juliano, Paraná, Peruca e Soledade. Com certeza a faculdade seria muito mais difícil sem vocês.

Aos laboratoristas do LAMTAC: Airton, Ari, Gilmar e Rafael que prestaram serviços de fundamental importância durante esta pesquisa.

Ao pessoal do LAPROM que se disponibilizou a ajudar nessa pesquisa. Em especial ao Michel, que não mediu esforços para auxiliar no jigue.

Aos colegas do NORIE que, de alguma forma, me ajudaram a concluir o trabalho. Em especial a Caroline Giordani, pela paciência e pelos ensinamentos.

A todos não mencionados anteriormente, mas que, de alguma forma, me ajudaram a concluir este trabalho.

*Existe uma coisa que minha longa existência me ensinou:  
toda a nossa ciência, comparada à realidade, é primitiva  
e inocente; e, portanto, é o que temos de mais valioso.*

*Albert Einstein*

## **RESUMO**

Atualmente, a indústria da construção civil é responsável por uma grande geração de resíduos de construção e demolição (RCD), os quais são, na maioria das vezes, descartados de forma imprópria na natureza, causando grandes impactos ambientais. Além disso, o setor da construção civil se destaca pela enorme extração de matérias primas não renováveis presentes na natureza. Desse modo, a utilização de RCD como agregados graúdos em concretos vem sendo alvo de inúmeras pesquisas, visando encontrar um destino em larga escala adequado a esse material e, além disso, suprir um possível esgotamento de matérias primas não renováveis que são extraídas continuamente do meio ambiente. No entanto, a grande dificuldade de utilizar materiais reciclados como agregados graúdos é a heterogeneidade de suas composições, gerando, conseqüentemente, um comportamento variável em misturas de concreto. Uma das formas de reduzir essa variabilidade do RCD é a separação por densidade dos grãos através do jigge pneumático, equipamento utilizado na indústria de mineração. Portanto, o presente trabalho visou analisar a influência do processo de jigagem a seco na variabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos de RCD, que foram coletados direto de uma usina de reciclagem. Para avaliar a eficiência do equipamento, foram moldados corpos de prova de concreto com agregados provenientes da camada de estratificação superior e inferior do jigge pneumático, comparando com os produzidos com o agregado reciclado de referência. Esses corpos de prova foram ensaiados a fim de avaliar suas propriedades mecânicas, resistência à compressão e módulo de elasticidade, e de durabilidade, penetração de íons cloreto. Em relação à resistência à compressão, os resultados mostraram uma ligeira melhora dos concretos produzidos com os agregados provenientes da bandeja inferior do equipamento e um decréscimo considerável com os da bandeja superior em relação ao agregado de referência. Além disso, notou-se a ineficiência do processo de jigagem a seco para reduzir a variabilidade de resistência dos concretos. O ensaio de módulo de elasticidade demonstrou um comportamento semelhante ao da resistência à compressão, com os concretos produzidos com a bandeja inferior com melhor desempenho em relação aos da bandeja superior. No entanto, em todos os traços obteve-se uma menor variabilidade de resultados nos concretos confeccionados com os grãos da parte superior de estratificação quando comparados aos da inferior. Quanto ao desempenho de durabilidade, o jigge pneumático se mostrou prejudicial frente à penetração de íons cloreto, de modo que os concretos ficaram mais vulneráveis aos ataques após o processamento do agregado no equipamento. No entanto, em relação a variação de resultados, com exceção do traço médio, todos os demais obtiveram um comportamento mais homogêneo quando avaliada essa propriedade. De maneira geral, não se confirmou a eficiência do processo de jigagem a seco em separar de forma expressiva o material reciclado coletado.

Palavras-chave: Resíduo de Construção e Demolição (RCD). Reaproveitamento de Resíduos. Agregados Graúdos Reciclados. Variabilidade de RCD. Concretos Reciclados. Separação por densidade. Jigagem a Seco.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma das etapas da pesquisa .....	21
Figura 2 – Total de RCD coletado nas regiões brasileiras (tx1000/ano) .....	24
Figura 3 – Etapas de utilização do RCD .....	28
Figura 4 – Implantação das usinas de reciclagem ao longo dos anos no Brasil .....	29
Figura 5 – Ruptura de aderência por cisalhamento em um corpo de prova de concreto .	36
Figura 6 – Resumo dos fatores influentes no módulo de elasticidade do concreto .....	39
Figura 7 – Diagrama ilustrativo da origem dos fatores dos agregados que caracterizam o concreto no estado fresco e endurecido .....	42
Figura 8 – Representação esquemática das condições de umidade dos agregados .....	44
Figura 9 – Variabilidade de curvas granulométricas dos agregados reciclados .....	47
Figura 10 - Representação esquemática do plano experimental do trabalho .....	55
Figura 11 - Local de coleta do material para o plano experimental.....	57
Figura 12 - Peneiramento e triagem do material coletado .....	58
Figura 13 - Componentes do jigue pneumático utilizado na pesquisa .....	59
Figura 14 - Ficha técnica do jigue pneumático .....	60
Figura 15 - Representação esquemática da segregação dos materiais .....	61
Figura 16 - Modelo de estratificação da câmara utilizado no trabalho .....	62
Figura 17 - Ensaio de caracterização realizados e suas respectivas normas .....	63
Figura 18 - Aspecto visual do agregado de RCD sendo submetidos ao ensaio de granulometria .....	64
Figura 19 - Influência do processo de jigagem a seco na granulometria dos agregados graúdos reciclados .....	65
Figura 20 - Comparativos dos grãos pós processo de jigagem .....	66
Figura 21 Separação e classificação dos grãos de RCD .....	68
Figura 22 - Médias das composições do RCDREF .....	69
Figura 23 - Médias das composições do RCDRJI .....	69
Figura 24 - Médias das composições do RCDJS .....	70
Figura 25 - Percentual de arenito nas rochas das diferentes amostras de RCD .....	70
Figura 26 - Aplicação de vácuo na amostra para ensaio de massa específica .....	73
Figura 27 - Influência do processo de jigagem a seco na massa específica dos agregados reciclados .....	73
Figura 28 - Preenchimento do RCD para o ensaio de massa unitária .....	75
Figura 29 - Comparativo de massa unitária dos agregados reciclados .....	75
Figura 30 - Ensaio de absorção de água .....	77



Figura 31 - Comparativos da taxa de absorção em função do tempo para cada tipo de agregado .....	78
Figura 32 - Influência do processo de jigagem na taxa de absorção de água dos agregados .....	79
Figura 33 - Aspecto visual dos agregados mantidos nas peneiras para secar a superfície dos grãos .....	83
Figura 34 - Etapas de produção do concreto .....	84
Figura 35 - Ensaio de compressão axial .....	85
Figura 36 - Ensaio de módulo de elasticidade à compressão .....	86
Figura 37 - Procedimentos do ensaio de penetração de íons cloreto .....	87
Figura 38 - Montagem do ensaio de penetração de íons cloreto .....	87
Figura 39 - Influência do processo de jigagem a seco na resistência à compressão aos 28 dias .....	90
Figura 40 - Ilustração do resultado da teste F (distribuição de Fischer) nos valores de resistência à compressão .....	91
Figura 41 - Influência do processo de jigagem nas curvas de dosagem .....	92
Figura 42 - Influência do processo de jigagem a seco no coeficiente de variação dos resultados de resistência à compressão .....	94
Figura 43 - Influência do processo de jigagem a seco na significância dos resultados de módulo de elasticidade .....	97
Figura 44 - Distribuição de Fischer para os resultados de módulo de elasticidade .....	98
Figura 45 - Influência do processo de jigagem a seco na variabilidade dos resultados de módulo de elasticidade .....	99
Figura 46 - Influência do processo de jigagem a seco na penetração de íons cloreto .....	102
Figura 47 - Distribuição de Fischer para os dados de penetração de íons cloreto .....	102
Figura 48 - Influência do processo de jigagem a seco na variabilidade do ensaio de penetração de íons cloreto .....	104

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 – Qualificação das propriedades dos britadores .....	33
Tabela 1 – Relação de perdas em diferentes obras .....	26
Tabela 2 – Composição de RCD em três cidades diferentes .....	32
Tabela 3 – Módulo de elasticidade de rochas de diferentes porosidades .....	38
Tabela 4 – Conjunto das de peneiras sucessivas para determinação da composição granulométrica .....	46
Tabela 5 – Influência do processo de jigagem a seco no módulo de finura dos agregados graúdos reciclados .....	64
Tabela 6 – Influência do processo de jigagem a seco no índice de forma dos agregados graúdos reciclados .....	66
Tabela 7 – Diferença de percentuais de composição após o processo de jigagem a seco	72
Tabela 8 – Comparativos de massa específica dos agregados graúdos reciclados utilizando o método de Leite (2001) .....	74
Tabela 9 – Comparativo de valores de massa unitária de agregados graúdos reciclados presentes na bibliografia .....	76
Tabela 10 – Características da areia utilizada no trabalho .....	80
Tabela 11 – Resumo das informações dos traços utilizados no trabalho .....	82
Tabela 12 – Classificação dos concretos em relação à penetração de íons cloreto mediante à carga passante .....	88
Tabela 13 – Dados referentes à resistência à compressão aos 28 dias, bem como os desvios e o coeficiente de variação dos traços e agregados .....	89
Tabela 14 – Análise de significância dos resultados de resistência à compressão .....	90
Tabela 15 – Dados referentes ao módulo de elasticidade estático .....	96
Tabela 16 – Análise de significância dos dados obtidos de módulo de elasticidade .....	96
Tabela 17 – Influência do processo de jigagem a seco na resistência à penetração de íons cloreto .....	101
Tabela 18 – Análise de significância do traço e processo de separação sobre a variável penetração de íons cloreto .....	101
Tabela 19 - Densidade aparente de alguns componentes do RCD coletado .....	105

## **LISTA DE SIGLAS**

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ABRECON - Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/c - Relação água/cimento

C - coulomb

Conama - Conselho Nacional do Meio Ambiente

GPa - Giga pascal

Kg - Quilograma

LAMTAC - Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído

LAPROM - Laboratório de Processamento Mineral

MPa - Mega Pascal

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

RCC - Resíduo de Construção Civil

RCD - Resíduo de Construção e Demolição

RCDJI - Agregado reciclado proveniente da bandeja inferior do jigge pneumático

RCDJS - Agregado reciclado proveniente da bandeja superior do jigge pneumático

RCDREF - Agregado reciclado coletado de referência

rpm - Rotações por minuto

RSU - Resíduo Sólido Urbano

SINDUSCON/RS - Sindicato da Indústria de Construção Civil do Rio Grande do Sul

V - Volt

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA .....</b>	<b>19</b>
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA .....	19
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	19
2.2.1 Objetivo Principal .....	19
2.2.2 Objetivos Secundários .....	19
2.3 HIPÓTESE .....	19
2.4 PRESSUPOSTO .....	20
2.5 DELIMITAÇÕES .....	20
2.6 LIMITAÇÕES .....	20
2.7 DELINEAMENTO .....	20
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
3.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO .....	23
3.1.1 Cenário do RCD no Brasil .....	23
3.1.2 Perdas na construção civil .....	25
3.1.3 Definições e classificações .....	26
3.1.4 Reciclagem .....	27
3.1.5 Estudos e aplicações de RCD como agregados em concretos .....	30
3.1.6 Variabilidade do RCD .....	31
3.1.7 Formas de reduzir a variabilidade .....	33
3.2 INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS NAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS .....	35
3.2.1 Resistência .....	35
3.2.2 Módulo de elasticidade .....	37
3.2.3 Durabilidade .....	40
3.3 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS .....	41
3.3.1 Massa específica e massa unitária .....	42
3.3.2 Absorção .....	43
3.3.3 Granulometria .....	45
3.3.4 Forma e textura .....	48
3.3.5 Impurezas .....	49
3.4 JIGAGEM .....	50
<b>4 PLANO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>54</b>

4.1 COLETA DA AMOSTRA DO RESÍDUO .....	56
4.2 PENEIRAMENTO E TRIAGEM .....	57
4.3 QUARTEAMENTO .....	58
4.4 JIGAGEM .....	59
<b>4.4.1 Descrição do equipamento</b> .....	59
<b>4.4.2 Realização do ensaio</b> .....	61
4.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO .....	62
<b>4.5.1 Granulometria e módulo de finura</b> .....	63
<b>4.5.2 Índice de forma</b> .....	66
<b>4.5.3 Composição</b> .....	67
<b>4.5.4 Massa específica</b> .....	72
<b>4.5.5 Massa unitária</b> .....	74
<b>4.5.6 Absorção</b> .....	76
4.6 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA .....	80
<b>4.6.1 Materiais utilizados</b> .....	80
4.6.1.1 Cimento .....	80
4.6.1.2 Agregado miúdo .....	80
4.6.1.3 Água .....	81
<b>4.6.2 Dosagem</b> .....	81
<b>4.6.3 Moldagem dos corpos de prova</b> .....	82
4.7 ENSAIOS DOS CORPOS DE PROVA .....	84
<b>4.7.1 Resistência à compressão axial</b> .....	84
<b>4.7.2 Módulo de elasticidade</b> .....	85
<b>4.7.3 Penetração de íons cloreto</b> .....	86
<b>5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	89
5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL .....	89
<b>5.1.1 Análise dos dados</b> .....	89
<b>5.1.2 Análise da influência do processo de jigagem a seco na variabilidade</b> .....	94
5.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	95
<b>5.2.1 Análise dos dados</b> .....	95
<b>5.2.2 Análise da influência do processo de jigagem a seco na variabilidade</b> .....	99

5.3 PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO .....	100
5.3.1 Análise dos dados .....	100
5.3.2 Análise da influência do processo de jigagem a seco na variabilidade .....	104
5.4 EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DO JIGUE PNEUMÁTICO .....	104
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>107</b>
6.1 CONCLUSÕES .....	107
6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	110
REFERÊNCIAS .....	111
ANEXO A .....	117
ANEXO B .....	119
ANEXO C .....	121
ANEXO D .....	123
ANEXO E .....	125
ANEXO F .....	127
ANEXO G .....	129





## 1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento demográfico e econômico mundial das últimas décadas, a quantidade gerada de resíduos sólidos urbanos (RSU) vem sendo cada vez maior. Segundo dados referentes da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE, 2015) foram gerados 79,9 milhões de toneladas desses resíduos no Brasil. Esse número, embora seja menor que os apresentados nos anos anteriores pela mesma pesquisa, ainda é alarmante. Segundo o SINDICATO DA INDÚSTRIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL (SINDUSCON - RS, 2015), 70% desses resíduos gerados são provenientes de reformas e autoconstruções, sendo descartados, na maioria das vezes, em aterros a céu aberto, acarretando um grande impacto ambiental.

Diante desse cenário, é imprescindível que haja uma conscientização das indústrias para reverter essa situação. A construção civil, responsável pelo crescimento de uma infraestrutura adequada para suprir as necessidades atuais de mercado e, conseqüentemente, uma grande geradora de resíduos, se destaca também pela utilização em massa de matérias primas não renováveis, reforçando ainda mais o dever de se buscar um desenvolvimento sustentável.

A reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) é uma das melhores alternativas para amenizar os impactos causados pela construção civil, visto que irá diminuir o volume de resíduos sólidos depositados nos aterros e a extração de matérias primas não renováveis. Além disso, o ato de reciclar propicia uma diminuição de descartes clandestinos, um crescimento de vida útil dos aterros e, conseqüentemente, uma redução de custos de gerenciamentos de resíduos (LEITE, 2001).

Embora as políticas de reciclagem de RCD sejam relativamente recentes, existem diversos estudos sobre a forma de como reaproveitar esse material na construção civil. Uma das maneiras é utilizá-lo na condição de agregado, tanto na forma miúda quanto graúda, em concretos. Dessa forma, é imprescindível que se conheça as características destes resíduos e o seu comportamento quando misturados com os outros materiais constituintes do concreto, tendo em vista o seu desempenho mecânico e a vida útil da estrutura.

O grande empecilho para a utilização de RCD é a heterogeneidade de seu comportamento, uma vez que, segundo Lovato (2007), a variabilidade de composição e origem dos materiais reciclados prejudicam sua aplicação em concretos. Além disso, a falta de ensaios normatizados torna a situação ainda mais difícil, uma vez que existem apenas pesquisas como base de estudo (CORDEIRO, 2013). Dessa forma, as empresas hesitam em produzir em larga escala de concretos utilizando agregados reciclados, tendo em vista a falta de garantia de desempenho da estrutura.

Em diversos países do mundo que não possuem grandes fontes de matérias primas não renováveis e, portanto, necessitam viabilizar a reciclagem de materiais, já são estudadas algumas formas de separação do RCD buscando a redução de sua heterogeneidade. Porém, alguns resultados foram satisfatórios apenas em âmbito laboratorial, visto que o processo não seria viável financeiramente devido a dificuldade de aplicá-lo em grande escala de produção (ZORTEA, F., 2014). Ultimamente, vem sendo experimentado um equipamento que é utilizado na indústria de mineração para separar objetos. Este aparelho, denominado jigue pneumático, trabalha de forma úmida ou seca sob pressão de ar e vibração das partículas, separando os materiais conforme suas densidades (CARRIJO; FIGUEIREDO, 2005).

Portanto, o presente trabalho visa analisar a variabilidade de comportamento de concretos confeccionados com RCD submetidos ao processo de separação por jigagem a seco, utilizando diferentes faixas de densidades do agregado. Através do equipamento, pretende-se diminuir a heterogeneidade das composições do material e, com isso, tornar viável o reaproveitamento de RCD.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes do trabalho estão descritas nos itens a seguir.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão que envolve o trabalho é: a partir da separação densimétrica, através do jigue pneumático, dos agregados graúdos de RCD, é possível diminuir a variabilidade de desempenho de concretos produzidos com esses agregados?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa, definidos como principal e específicos, estão descritos nos itens a seguir.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal do trabalho é verificar se há redução da variabilidade das propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos confeccionados com agregados graúdos de RCD, submetidos a separação densitária pelo jigue pneumático.

#### **2.2.2 Objetivos específicos**

Um dos objetivos específicos do trabalho é avaliar a influência do processo de jigagem a seco na caracterização dos agregados reciclados, comparados antes e após serem submetidos ao equipamento.

### **2.3 HIPÓTESE**

Considerando que o jigue tenha uma eficácia adequada, os concretos produzidos com agregados graúdos de RCD terão propriedades mecânicas e desempenho de durabilidade mais homogêneo.

## 2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que os grandes empecilhos do uso de concretos confeccionados com agregados graúdos de RCD são a variabilidade de desempenhos e a heterogeneidade das suas composições. Dessa forma, é indispensável a utilização de um método que separe esse material em densidades semelhantes.

## 2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a avaliar o quanto será reduzida a variabilidade de desempenho dos concretos produzidos com o agregado graúdo de RCD através dos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e penetração de íons cloreto.

## 2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) serão confeccionados concretos apenas utilizando agregados graúdos de RCD;
- b) os materiais provenientes foram buscados em apenas um aterro como fonte;
- c) impurezas que podem causar efeitos deletérios nos concretos foram previamente separadas e descartadas.

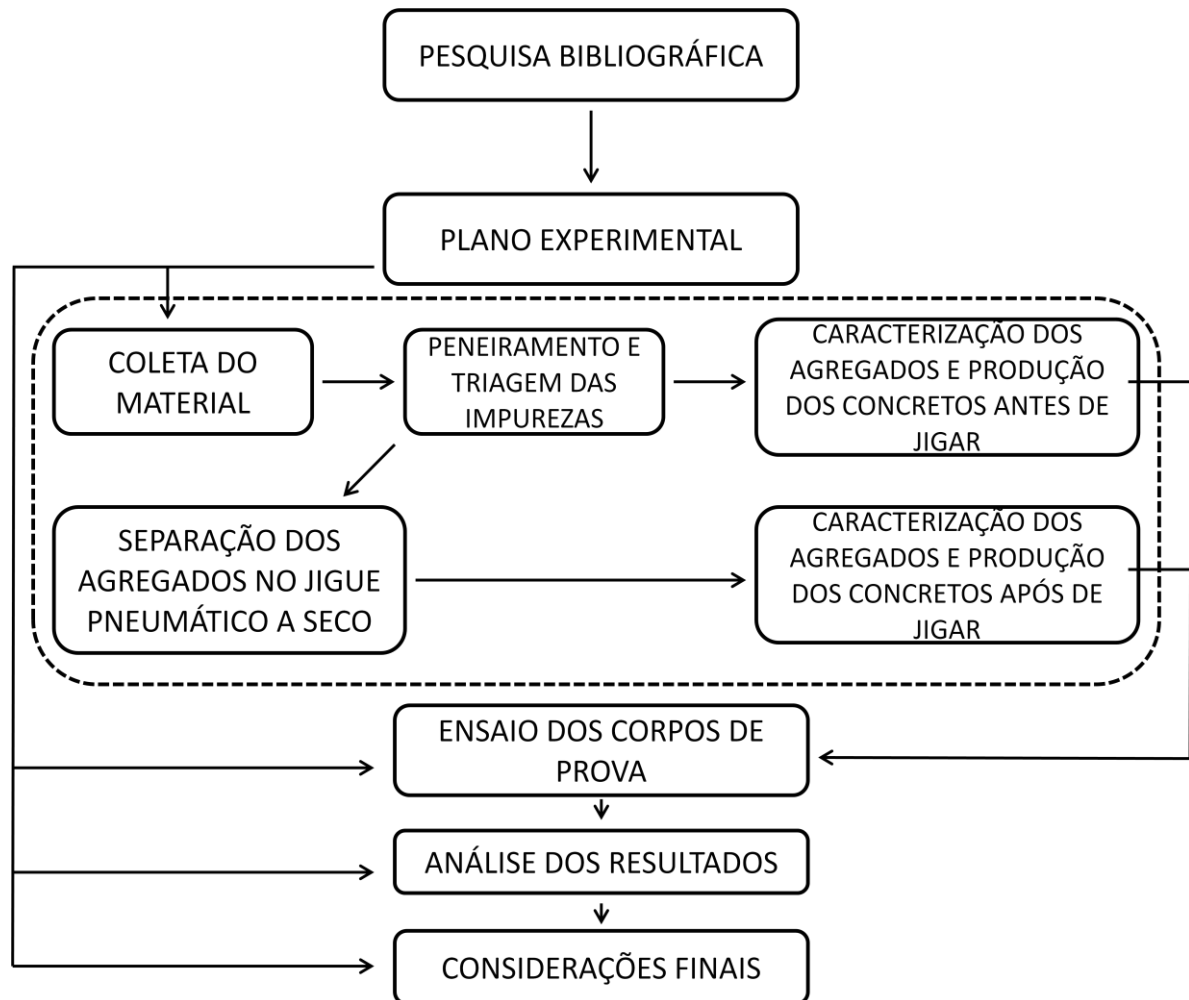
## 2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado conforme as etapas descritas a seguir:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) plano experimental,
  - recolhimento dos agregados no aterro escolhido;
  - peneiramento dos agregados e separação das impurezas;
  - caracterização dos agregados e produção dos concretos antes da jigagem;
  - separação densitária dos agregados por meio do jigue pneumático a seco;
  - caracterização dos agregados e produção dos concretos após a jigagem.
- c) ensaios dos corpos de prova em laboratório;
- d) análise dos resultados;
- e) considerações finais.

A sequência das etapas descritas acima pode ser visualizada na figura 1.

Figura 1 - Fluxograma das etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

A etapa de **pesquisa bibliográfica** foi realizada durante toda a execução do trabalho, buscando conceitos teóricos redigidos por trabalhos anteriores e normas técnicas para elaboração dos ensaios de laboratório. Nessa etapa, foi analisada a importância de reaproveitar os materiais provenientes de aterros e de restos de obras, e, além disso, destacou-se as características do RCD como fonte de agregados para concretos. Dessa forma, buscou-se transcrever os empecilhos para a utilização dos agregados reciclados e, também, as influências que o mesmo pode apresentar na produção de concretos. Além disso, foi detalhado o funcionamento do jigue pneumático, equipamento utilizado na mineração para separar por densidade os materiais.

O **plano experimental** iniciou com a busca e o **recolhimento do material** proveniente de um aterro selecionado para o trabalho. O agregado reciclado, já britado, foi levado para o laboratório, onde ocorreu a fase de **peneiramento e triagem das impurezas**. Foram então realizados os ensaios de laboratório para caracterizar o material antes de jogar e produzir os concretos de referência. A fase seguinte consistiu na **separação dos agregados no air jig**, onde os materiais recolhidos ficam retidos em diferentes densidades nas bandejas sobrepostas do equipamento. O material utilizado estava contido na bandeja superior e inferior do equipamento, de modo que foi descartado o material intermediário. Da mesma forma, os agregados foram caracterizados em laboratório, bem como a confecção dos concretos com os mesmos.

Depois disso, a etapa seguinte foi a realização dos **ensaios dos corpos de prova** devidamente curados conforme as respectivas normas. Os ensaios elaborados buscaram avaliar a resistência à compressão, módulo de elasticidade e penetração de íons cloretos nos concretos produzidos.

A fase de **análise de resultados** consistiu na realização de uma avaliação estatística do que foi obtido, a fim de buscar uma resposta para a questão da pesquisa, ou seja, se a variabilidade dos resultados é ou não alterada com o uso do jigue pneumático a seco.

Por fim, a etapa de **considerações finais** foi reservada para a conclusão do trabalho, últimas análises e sugestões para trabalhos posteriores.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Os tópicos a seguir irão discutir questões como origem dos resíduos de construção civil no Brasil, motivos de sua formação, definições e classificações, formas de como reaproveitar o material e características como agregado reciclado, a fim de justificar a sua utilização em concretos.

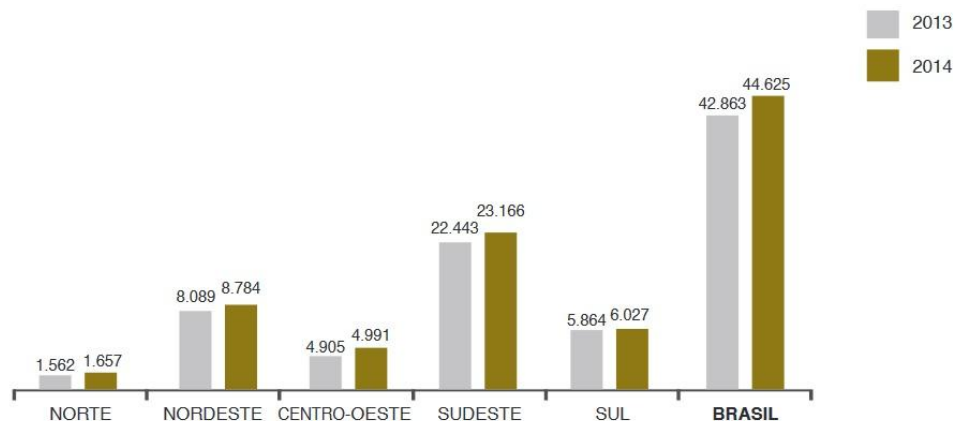
### 3.1.1 Cenário do RCD no Brasil

A prática de geração de resíduos se torna inevitável, de modo que toda a atividade humana resulta em desperdícios, restos, sobras, entre outros. A grande preocupação de autoridades ambientais gira em torno de como gerenciar o descarte correto desses materiais, a fim de minimizar prejuízos ao meio ambiente (CABRAL, 2007).

A construção civil tem grande responsabilidade em atender as exigências do mercado consumidor de forma adequada através de condomínios, conjuntos habitacionais, infraestrutura de cidades e estradas, entre outros. Dessa forma, apresenta-se como uma indústria de alto grau de poluição, principalmente pelos resíduos gerados por essas obras e reformas. Nos últimos anos, esse número de restos de obras vem subindo de forma expressiva no Brasil. Segundo a pesquisa feita pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE), no ano de 2014, aumentou em 4,1% as coletas públicas de RCD nos municípios brasileiros em relação a 2013. Fato que pode ser explicado pelo grande número de obras do período decorrente do avanço econômico e populacional.

A figura 2 mostra um resumo comparativo da quantidade de RCD coletada de 2013 e 2014 nas diferentes regiões do Brasil. O gráfico mostra que foram coletados cerca de 45 milhões de toneladas de RCD. Esse número é bastante expressivo, visto que, através da mesma pesquisa, foram coletados em torno de 73 milhões de toneladas de RSU, que é decorrente de toda a atividade humana. Além disso, os dados relativos ao recolhimento de RCD não consideram os rejeitos coletados pelos serviços privados.

Figura 2 - Total de RCD coletado nas regiões brasileiras (tx1000/ano)



(fonte: pesquisa ABRELPE, 2014)

De forma a minimizar os impactos ambientais nos municípios brasileiros, a Lei Federal nº 12.305 (BRASIL, 2010) determina a **POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS** (PNRS) e salienta em seu Art. 4º:

[...] A Política Nacional de Resíduos Sólidos reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotados pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos [...]

Alguns progressos foram registrados a partir de 2010. Conforme dados de Abrelpe (2014), a cobertura de serviços de coletas aumentaram de 88,98% para 90,68%, relacionando 2010 a 2014. No entanto, a preocupação com a destinação final dos resíduos sólidos continua. A mesma pesquisa aponta que o número de resíduos sólidos descartados de maneira imprópria chegou a 30 milhões de toneladas em 2014.

A cidade de Porto Alegre apresenta 42 locais de disposição de RCD, sendo apenas 4 descritos de forma regular na prefeitura (SILVA, 2014). Segundo dados da autora, 9 áreas de disposição foram analisadas e classificadas. Apenas os locais regularizados na prefeitura possuem desempenho adequado. A autora conclui que o fato de apenas as áreas legalizadas estarem de acordo com os critérios de qualidade estabelecidos pela mesma prova que as regulamentações dos municípios dão resultados para atenuar os impactos ambientais causados pelos resíduos descartados.



O gerenciamento na produção dos resíduos no Brasil, de forma geral, não é adequado e necessita de políticas e um melhor acompanhamento ambiental (ZORTEA, F., 2014). Acredita-se que uma gestão que regule as disposições irregulares atraia economicamente a reciclagem e minimize os custos de transporte dos resíduos sejam exemplos de como atenuar os impactos ambientais e sociais causados pela disposição irregular de RCD no Brasil (ANGULO, 2005).

### **3.1.2 Perdas na construção civil**

Os resíduos que são gerados pela construção podem ser originados por diversos motivos, como catástrofes naturais (terremotos, incêndios, desabamentos), desperdícios da própria construção, demolições de edificações existentes, entre outros (LOVATO, 2007). Ao contrário do que se imagina, os resíduos gerados na construção civil não se resumem à etapa de execução das atividades construtivas, uma vez que podem ser originados em todas as fases do processo, como projeto e planejamento da obra (AMADEI et al., 2012).

Segundo Formoso et al. (1996), grande parte das perdas que existem nas obras são evitáveis e podem ser contornadas de formas relativamente simples através de novos métodos construtivos e filosofias de gestão. Os autores ainda comentam, através do estudo de caso apresentado, que a má gerência das obras causou mais desperdícios que os próprios operários. Grande parcela das perdas foram originadas em atividades que antecedem os serviços de canteiros de obras, como mau detalhamento de projetos, compras mal efetuadas e problemas no setor de suprimentos das empresas.

A tabela 1 apresenta dados elaborados por Formoso et al. (1996) sobre o índice de perdas totais em cinco obras diferentes, considerando o quanto foi comprado além do que era necessário. Segundo os autores, a ausência de uma política administrativa para controlar os materiais foi determinante para esses desperdícios serem significativos. Uma das conclusões abordadas revela que as perdas eram relativamente simples de serem amenizadas, fato explicado pela falta de interesse dos representantes pelas obras em resolver o problema.

Tabela 1 - Relação de perdas em diferentes obras (%)

<b>Material</b>	<b>Obra A</b>	<b>Obra B</b>	<b>Obra C</b>	<b>Obra D</b>	<b>Obra E</b>	<b>Média</b>
Aço	18,8	27,3	23,01	7,91	18,31	19,07
Cimento	76,6	45,2	34,31	151,86	112,7	84,13
Concreto	10,8	11,77	17,44	0,75	25,16	13,18
Areia	27,09	29,73	21,05	109,81	42,19	45,97
Argamassa	103,05	87,5	40,38	152,1	73,24	91,25
Bloco Cerâmico	39,9	8,2	35,96	26,5	-	27,64
Tijolo Maciço	45,25	15,23	20,02	27,28	-	26,95

(fonte: adaptado de Formoso et al., 1996)

Resíduos relacionados a manutenções de edifícios são provenientes de patologias, demolições parciais devido a reformas da edificação e descarte de materiais que atingiram a vida útil (JOHN; AGOPYAN, 2000). De forma a minimizar as correções nas construções existentes e, conseqüentemente, os resíduos gerados, os autores comentam algumas medidas preventivas, tais como:

- (a) melhoria da qualidade da construção, de forma a reduzir manutenções causadas pela correção de defeitos;
- (b) projetos flexíveis, que permitam modificações substanciais nos edifícios através da desmontagem que permita a reutilização dos componentes não mais necessários;
- (c) aumento da vida útil física dos diferentes componentes e da estrutura dos edifícios.

De forma geral, o primeiro passo para minimizar os impactos ambientais gerados pelo RCD é a redução das perdas em todas as etapas da construção civil, tornando mais consciente a utilização dos recursos naturais e, dessa forma, reduzindo os custos de construção e gerenciamento dos resíduos (AMADEI et al., 2012). Para atenuar essas perdas, muitas vezes evitáveis, é importante que todos os setores da indústria de construção civil se mobilize com diferentes técnicas construtivas e outras maneiras de gestão (FORMOSO et al., 1996).

### 3.1.3 Definições e classificações

Os agregados reciclados são constituídos por diversos materiais. Suas composições dependem basicamente de onde foi originado e do tipo de obra que foi coletado (LOVATO, 2007). Segundo a resolução nº 307 do Conama (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002), os resíduos de construção civil são descritos como:

[...] são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc..., comumente chamados de entulhos, calça ou metralha [...].

A mesma resolução nº 307 do Conama ainda classifica os resíduos conforme suas composições e origens:

- I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
  - a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
  - b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: materiais cerâmicas (tijolos, azulejos, blocos, telhas, placas de revestimento...etc) argamassa e concreto.
  - c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc..) produzidos nos canteiros de obras.
- II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e outros;
- III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;
- IV - Classe D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

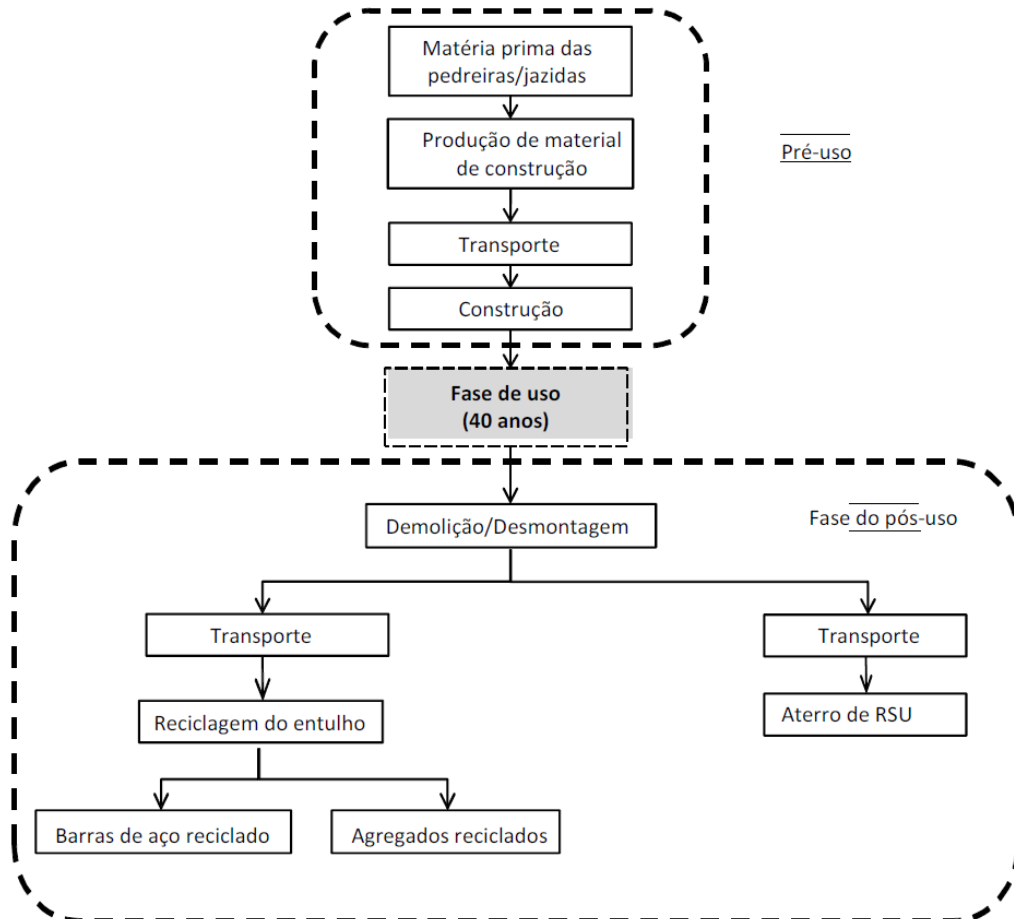
A partir das regulamentações feitas pelo Conama em 2002, a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) colocou em vigor, em 2004, a NBR 15113, visando a necessidade de uma correta gestão dos resíduos, a possibilidade de utilização futura desses materiais e a minimização de impactos ambientais das populações vizinhas dos aterros.

### 3.1.4 Reciclagem

A reciclagem de RCD apresenta-se como uma grande solução para a minimização dos impactos ambientais gerados pela construção civil. Segundo Carneiro (2005), a diminuição do uso de recursos naturais e, assim, uma maior vida útil das suas reservas, a redução de descartes irregulares de RCD e de volume desses materiais nos aterros são também algumas regalias desse processo de reaproveitamento. De acordo com Leite (2001), a reciclagem possui vantagens econômicas, como a diminuição dos gastos com o gerenciamento dos

resíduos e com o transporte dos mesmos, além de reduzir os desgastes em aterros, entre outros. A figura 3 mostra o ciclo de vida do RCD.

Figura 3 - Etapas de utilização do RCD

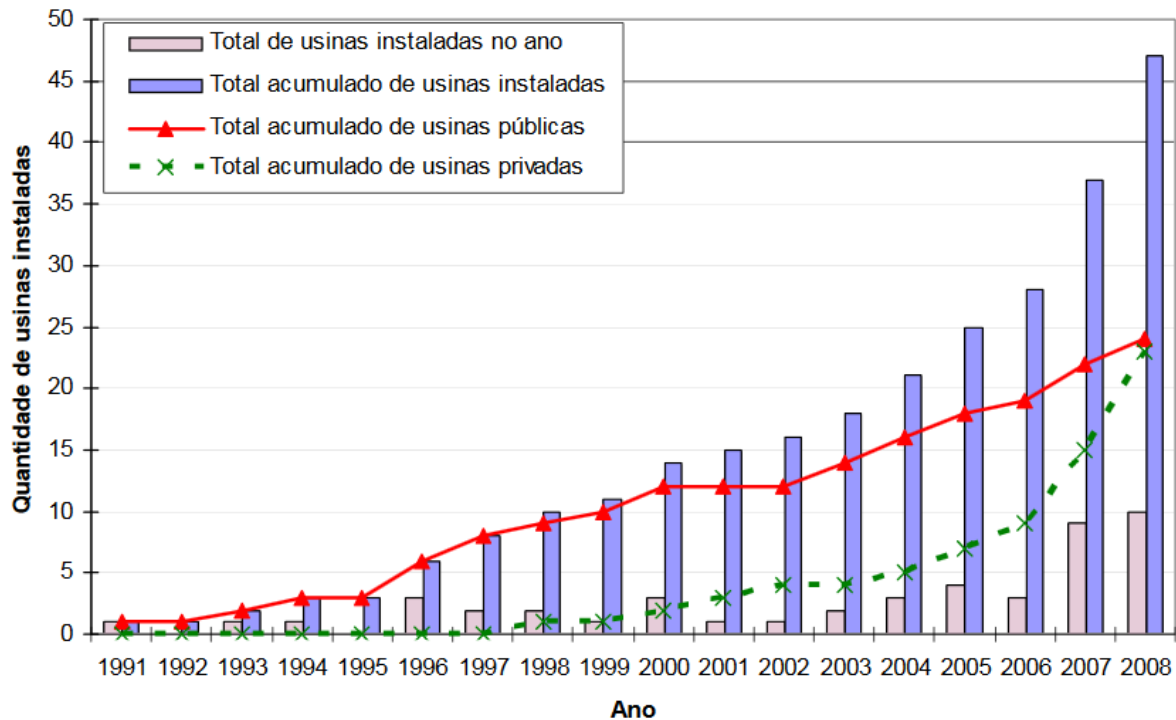


(fonte: Amelia Craighill and Jane C. Powel, Working Paper 99-03.CSERGE 1999<sup>1</sup> apud Lima, 2013)

A partir da resolução nº 307 do Conama, o número de usinas de reciclagem no Brasil cresceu consideravelmente. Segundo a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (ABRECON, 2017), existem 310 usinas de reciclagem mapeadas no Brasil atualmente. A figura 4 mostra a taxa de crescimento do número de usinas de reciclagem classe A de RCD ao longo dos anos.

<sup>1</sup> CRAIGHILL, A.; POWELL, J.C. A lifecycle assessment and evaluation of construction and demolition waste. Reino Unido: CSERGE, 1999. ISSN 0967-8875.

Figura 4 - Implantação das usinas de reciclagem ao longo dos anos no Brasil



(fonte Miranda et al., 2009)

Os resíduos de construção civil podem ser tratados em diferentes plantas de usinas de reciclagem: fixas, semi-móveis e móveis. As plantas fixas são caracterizadas por obter produtos de uma qualidade superior às outras, sendo definitivas em algum local. As plantas semi-móveis possuem facilidade de montagem e desmontagem, recomendadas para construção de barragens hidrelétricas e estradas. As plantas móveis são indicadas para empreendimentos flexíveis e são mais econômicas, visto que não possuem gastos de montagens e desmontagens (CORRÊA et al., 2009).

Segundo Miranda (2005), os principais equipamentos utilizados na reciclagem de resíduos classe A da construção civil são:

- a) alimentador vibratório;
- b) grelha Vibratória;
- c) equipamentos de transporte;
- d) separadores magnéticos;
- e) britadores;
- f) moinhos;
- g) peneiras vibratórias;

- h) equipamentos para processo de reciclagem via úmida;
- i) equipamentos e técnicas para redução da variabilidade do RCC.

### **3.1.5 Estudos e aplicações de RCD como agregados em concretos**

Atualmente, há diversas aplicações de agregados reciclados na indústria da construção civil, como blocos de pavimentação, blocos de alvenaria, concretos, entre outras (SILVA; MACIEL, 2014). A maioria do RCD reciclado ainda é utilizado como base na área de pavimentação e, como no Brasil ainda existem muitas ruas que não são pavimentadas, essa tecnologia se torna um grande avanço para o reaproveitamento desse material. Porém, ainda se necessita de outras aplicações em grande escala para o RCD, uma vez que nem todo o resíduo consegue ser reaproveitado apenas na pavimentação (ANGULO; JOHN, 2002).

Devido à necessidade de buscar outros tipos de materiais na indústria da construção civil, existem diversas pesquisas que abordam a substituição por agregados reciclados de agregados fontes naturais, avaliando seus desempenhos em misturas de concreto (SENISSE, 2015).

Zordan (1997) abordou características mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados e contribuiu com informações importantes sobre as misturas. Embora a grande variabilidade das composições, as amostras alcançaram valores positivos nos ensaios. Os valores de resistência à abrasão dos concretos produzidos com RCD apresentaram em média uma melhora de 26,5% em relação aos de agregados naturais. Além disso, através dos resultados obtidos, o autor atestou diversas aplicações para o RCD, como peças de concreto utilizadas em drenagem superficial de estradas, blocos de calçamento, blocos de concreto com função apenas de vedação, concretos não estruturais e elementos de infraestrutura urbana (guias, sarjetas, entre outros).

Leite (2001) avaliou o comportamento de agregados miúdos e grãos reciclados e as características mecânicas dos concretos produzidos. Em relação à resistência à compressão, constatou-se a possibilidade de produzir concretos com resistências adequadas através da utilização de agregados miúdos reciclados nas misturas, obtendo até crescimento de resistências aos 28 e 91 dias. Em relação aos concretos confeccionados com agregados grãos e miúdos de RCD misturados, há a viabilidade de se obter resistências apropriadas, desde que se utilize baixas relações a/c e teores de substituição por agregados naturais.

No plano experimental elaborado por Buttler (2003), foi concluído que os concretos confeccionados com agregados graúdos de RCD apresentaram um leve aumento de resistências à compressão e tração em relação aos agregados naturais. O autor comenta que o processo de cura úmida interna e a qualidade dos agregados reciclados coletados são alguns fatores que podem explicar os resultados obtidos.

Vieira (2003) avaliou a possibilidade de utilizar agregados reciclados em concretos estruturais. A partir da análise das taxas de corrosão, foi comprovado que, a medida que aumentava a proporção de agregados miúdos de RCD nas misturas, diminuía os potenciais de corrosão. No entanto, esse comportamento não foi verificado quando utilizados agregados graúdos de RCD, atingindo níveis acima dos aceitáveis.

Cabral (2007) constatou um aumento de 7% e 14% na resistência à compressão de concretos utilizando agregados miúdos reciclados provenientes de cerâmica vermelha para 50% e 100% de substituição, respectivamente. O autor afirma que o fato pode ser explicado pelas reações pozolânicas que ocorrem na matriz do concreto, melhorando os aspectos mecânicos da mistura.

Segundo Vieira (2003), diversos países europeus já utilizam concretos com agregados reciclados em casas residenciais, portos marítimos e concretos de alta resistência. Porém, segundo Morand (2016), o Brasil ainda não possui altos índices de reaproveitamento desses materiais, visto que não possui bons processos de separação na fonte e, na grande maioria, possui instalações simples de beneficiamento, o que impede uma maior aplicação de materiais reciclados devido a sua heterogeneidade.

### **3.1.6 Variabilidade do RCD**

É consenso que a reciclagem dos resíduos gerados pela construção civil é uma solução para os prejuízos ambientais e sociais causados e, também, a utilização desses materiais como agregados em concretos é uma das alternativas para o seu reaproveitamento em grandes escalas. Porém, de acordo com Vieira (2003), as características heterogêneas do RCD não permitem que os concretos produzidos com esses agregados atinjam valores confiáveis de desempenho. Segundo Angulo (2000), essa variabilidade de resultados é um dos grandes entraves para maiores usos desses materiais, uma vez que esta imprevisibilidade nos valores

de resistência e durabilidade dos componentes construídos afastam o interesse das empresas em utilizar essa tecnologia.

Conforme dito anteriormente, a composição do RCD é gerada pelas novas construções, reformas e demolições de diferentes locais. Segundo Angulo (2000), a diversidade de técnicas construtivas utilizadas nas obras e a diferença entre os cronogramas adotados pelas empresas, que gera uma irregularidade de utilização dos materiais e índices de perdas variáveis, são alguns fatores que influenciam na heterogeneidade do RCD.

Tal fato pode ser comprovado através da tabela 1, mostrada no item 3.1.2, visto que, embora as obras aconteceram simultaneamente, o índice de desperdícios foram bem distintos entre as mesmas.

De acordo com Carneiro (2005), as propriedades dos resíduos variam para cada estado, país, cidade e até entre obras do mesmo bairro. A autora ainda destaca os principais aspectos que justificam a heterogeneidade dos resíduos:

- a) o nível de desenvolvimento da indústria da construção local:
  - qualidade e treinamento da mão-de-obra disponível;
  - técnicas de construção e demolição empregadas;
  - adoção de programas de qualidade e de redução de perdas;
  - adoção de processos de reciclagem e reutilização no canteiro;
- b) os tipos de materiais predominantes e/ou disponíveis na região;
- c) o desenvolvimento de obras especiais na região (metrô, esgotamento sanitário, restauração de centros históricos, entre outros);
- d) o desenvolvimento econômico da região;
- e) a demanda por novas construções.

A tabela 2 apresenta as composições de RCD coletado por Lovato (2007), verificando-se a heterogeneidade das amostras.

Tabela 2 - Composição de RCD em três cidades diferentes (%)

<b>Material</b>	<b>Porto Alegre</b>	<b>Novo Hamburgo</b>	<b>São Leopoldo</b>
Concreto	18,30	27,30	26,90
Argamassa	44,20	34,90	22,50
Rochas	1,80	14,50	17,40
Cerâmica Vermelha	35,60	23,20	32,80
Cerâmica Branca	0,10	0,20	0,40

(fonte: adaptado de Lovato, 2007)



É importante ressaltar que as composições heterogêneas dos RCD são diferentes das dos agregados reciclados, uma vez que possuem características distintas antes e após o processamento (ANGULO, 2000).

A britagem é a fase mais importante em uma usina de reciclagem para qualificar as propriedades dos agregados (JADOVSKI, 2005). Existem diversos tipos de britadores, dependendo da necessidade de utilização. A seleção do maquinário utilizado depende do consumo de energia, produção e qualidade do produto obtido (SÁNCHEZ, 2004). O quadro 1 apresenta os britadores utilizados e os fatores a serem avaliados para a sua escolha.

Quadro 1 - Qualificação das propriedades dos britadores

<b>Propriedades</b>	<b>Britador de Mandíbulas</b>	<b>Britador de Cone</b>	<b>Britador de Impacto</b>
Capacidade	Alto	Médio	Baixo
Custo de produção	Baixo	Médio	Alto
Desgaste	Baixo	Baixo	Alto
Qualidade do agregado	Baixo	Médio	Alto
Conteúdo de finos	Baixo	Médio	Alto
Consumo de energia	Baixo	Médio	Alto

(fonte Sánchez, 2004)

Souza et al. (2016) compararam a influência dos britadores de mandíbulas e de impactos nas propriedades dos agregados reciclados, tais como distribuição granulométrica, índice de forma, massa unitária e específica, absorção de água, teor de argamassa aderida e abrasão Los Angeles. Conforme concluíram os autores, as distribuições granulométricas apresentaram comportamentos distintos para partículas menores que 4,8 mm, visto que o britador de mandíbula não possui a qualidade esperada para essa fração. Devido a essa maior produção de materiais finos, a massa unitária dos materiais produzidos pelo britador de impactos foi maior em comparação ao de mandíbulas. De forma geral, outras propriedades tiveram mais interferência na origem do RCD do que o tipo de britador utilizado.

### 3.1.7 Formas de reduzir a variabilidade

Sabe-se, então, que a heterogeneidade de composição dos agregados reciclados é um fator prejudicial para utilizá-los em produções de concreto. Portanto, segundo Lovato (2007),

encontrar um método eficaz que controle essa variabilidade seria de fundamental importância, visto que acarretaria em valores mais precisos e confiáveis de resistência e durabilidade dos concretos.

Cabral (2007) comenta que para produzir agregados é indispensável a separação dos materiais não inertes presentes nas fontes, uma vez que apenas os materiais inertes apresentam um melhor potencial de reciclagem para uma boa qualidade de agregado. O autor ainda comenta que essa triagem de materiais poderia ser iniciada nos canteiros de obras onde o resíduo foi gerado.

Angulo et al. (2004), em seu estudo experimental, testaram a viabilidade de utilização de líquidos densos como método de separação dos agregados de RCD. Os resultados mostraram que essa solução foi de grande importância, uma vez que o método permitiu separar os materiais com porosidades e mineralogias distintas. Além disso, foi possível separar os contaminantes presentes nos resíduos, como madeiras, papéis e materiais betuminosos, visto que suas densidades são menores que os outros materiais presentes. Os autores ainda comentam que, juntamente com técnicas de catação ou análise de imagem, o processo de controle de qualidade do agregado tende a ser mais rápido utilizando esse método de separação.

Equipamentos de separação densitária da área da engenharia de minas e metalúrgica já vêm sendo utilizados na separação de RCD em países da Europa e Estados Unidos. A utilização de aparelhos denominados jigues é normalmente através de meio úmido, sendo utilizado principalmente para separar os contaminantes presente no RCD, a fim de respeitar as legislações que exijam essa triagem desses materiais. Apesar de ser um equipamento de baixo custo, necessita de um alto volume de água nessa operação e, conseqüentemente, custos maiores de tratamento das mesmas (CARRIJO; FIGUEIREDO, 2005).

Recentemente, estudos sobre a utilização do processo de separação a seco pelo jigue foram abordados por Zortea F. (2014), Zortea J. (2014) e Corrêa (2014), os quais avaliaram o desempenho dessa técnica em diferentes situações. O presente trabalho avaliará esse método de separação, que irá ser tratado no item 3.4.

## 3.2 INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS NAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS

Os agregados em geral são tratados como materiais inertes que preenchem a matriz do concreto. No entanto, essa definição já vem sendo questionada, visto que suas características são de grande importância nas propriedades dos concretos, uma vez que estão diretamente ligados à porosidade, resistência, módulo de elasticidade dessas confecções (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

### 3.2.1 Resistência

De forma geral, a resistência é considerada um dos parâmetros que melhor associa a qualidade do concreto em si, mesmo havendo outras características importantes a serem avaliadas (NEVILLE; BROOKS, 2013). Isso pode ser explicado pelo fato de que propriedades como módulo de elasticidade, estanqueidade, permeabilidade e resistência a intempéries estão diretamente relacionadas com a resistência do concreto, podendo ser deduzidas através dos resultados obtidos (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A resistência é influenciada pela presença de falhas, descontinuidades e poros presentes na matriz do concreto, de modo que esses fatores podem ser originados de várias formas diferentes (NEVILLE; BROOKS, 2013). De maneira geral, a principal influência na resistência do concreto é a sua porosidade, sabendo que existe uma relação de inversa proporção entre esses dois fatores. Além de prejudicar a matriz do concreto em si, o alto grau de porosidade diminui a resistência da zona de transição entre os agregados graúdos e a pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

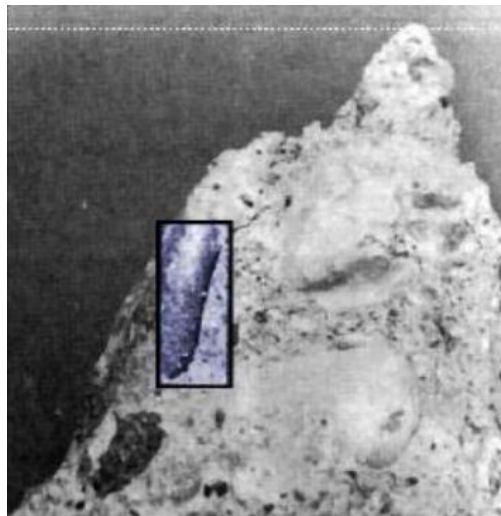
Entre a principal causa da presença de poros nos concretos, a lei de Abrams, em 1918, constatou que a relação água/cimento ( $a/c$ ) está relacionada diretamente com a resistência à compressão do concreto, uma vez que com o aumento dessa proporção ocasiona um enfraquecimento da matriz do concreto devido ao maior número de poros presente na mistura (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Além disso, é importante ressaltar que a relação resistência e porosidade independe da presença de água nesses vazios capilares (NEVILLE; BROOKS, 2013). O ar aprisionado

dentro da mistura também aumenta significativamente os vazios presentes na matriz de concreto, por consequência de adensamentos incorretos e/ou inserção de aditivos incorporadores de ar. Considerando uma melhora na trabalhabilidade e compacidade de mistura, vale ressaltar que, em concretos com baixos teores de cimento e altas relações a/c, o ar incorporado associado a menor quantidade de água na mistura pode aumentar resistência da zona de transição em maiores proporções que a diminuição da resistência da matriz, sendo um fator positivo para a resistência global do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A influência dos agregados graúdos é tratada de forma secundária nas resistências dos concretos, uma vez que eles suportam, na maioria das vezes, cargas relativamente maiores do que a matriz e a zona de transição. Dessa forma, é mais comum os concretos romperem pela interface ou pela matriz (MEHTA; MONTEIRO, 1994). A figura 5 destaca a zona de transição do concreto em uma ruptura por cisalhamento de um corpo de prova.

Figura 5 - Ruptura de aderência por cisalhamento em um corpo de prova de concreto



(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 1994)

Embora as propriedades mecânicas dos agregados não sejam de fundamental importância para determinar a resistência dos concretos, as características desses materiais, tais como tamanho, forma, textura, granulometria e mineralogia podem influenciar indiretamente na qualidade do concreto. Algumas mudanças nesses fatores podem acarretar na diminuição da quantidade de água de amassamento a ser utilizada, diminuindo a relação a/c da estrutura e aumentando a resistência do concreto. Além disso, essas propriedades dos agregados podem melhorar,

independente da relação a/c, as zonas de transições e, conseqüentemente, aumentar as capacidade de carga do conjunto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Em relação aos agregados de RCD deve ser levado em conta os fatores já mencionados, considerando ainda a resistência do próprio agregado. Cabral (2007) comenta que a resistência dos agregados reciclados é de fundamental importância quando esta for menor que a resistência da matriz, uma vez que o rompimento será provavelmente no próprio material. Fato confirmado por Buttler (2003) que, ao utilizar concretos de baixas relações a/c, observou uma grande relação entre a qualidade do resíduo utilizado e o material produzido.

As diferentes características dos agregados reciclados comparadas com os naturais são determinantes para a resistência do concreto em questão. Leite (2001) destaca a rugosidade e a absorção do agregado reciclado, fatores que contribuem para uma maior aderência entre os agregados e a pasta de cimento. Dessa forma, a autora ressalta a melhoria da zona de transição dos concretos produzidos com esses materiais, salientando que, apesar do ganho de resistência nessa região, os agregados graúdos podem possuir grãos mais frágeis que a matriz, impedindo que a resistência global do concreto seja mais elevada.

Embora a grande variabilidade do RCD ainda seja o principal empecilho, que já fora mencionado, para utilização em confecções de concretos, é possível adquirir valores de resistências adequados. Segundo Cabral (2007), para obter esses valores, deve-se levar em conta a composição dos resíduos reciclados e aplicar uma metodologia adequada para substituição dos agregados naturais pelos mesmos.

### **3.2.2 Módulo de elasticidade**

Ao se avaliar a relação tensão-deformação do concreto, pode-se concluir que o material possui um comportamento não linear, uma vez que o mesmo não apresenta características elásticas ao longo do tempo, de modo que as cargas aplicadas não são diretamente proporcionais às deformações. Mesmo antes da aplicação de cargas instantâneas, o concreto já possui algumas fissuras na sua zona de transição que são causadas, entre outros fatores, pelas características de exsudação e cura. Apesar desse comportamento do concreto, é indispensável estimativas do módulo de deformação e as características elásticas desse material para medir

sua rigidez, bem como determinar as tensões induzidas pelas deformações associadas aos efeitos ambientais (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Diferentemente dos parâmetros de resistência em que é tratado de forma secundária, os agregados graúdos são de fundamental importância para determinar os valores de módulo de elasticidade do concreto. Segundo Neville e Brooks (2013), o módulo do concreto está diretamente ligado ao módulo do agregado e ao volume do mesmo. Normalmente, os agregados possuem valores de módulo significativamente maiores que a matriz, de modo que quanto maiores forem os valores dos módulos e volume dos agregados, maiores serão os valores do conjunto.

A grande propriedade do agregado para definir o módulo de elasticidade é a sua porosidade, uma vez que essa determina a rigidez do material. Além disso, a dimensão máxima, a forma, a textura superficial, a granulometria e a composição mineralógica também são características dos agregados que podem influenciar na zona de transição e, conseqüentemente, nas propriedades de deformação do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994). A tabela 3 apresenta alguns dados de módulos de deformação de rochas utilizadas como agregados em concretos que possuem diferentes porosidades.

Tabela 3 - Módulo de elasticidade de rochas de diferentes porosidades

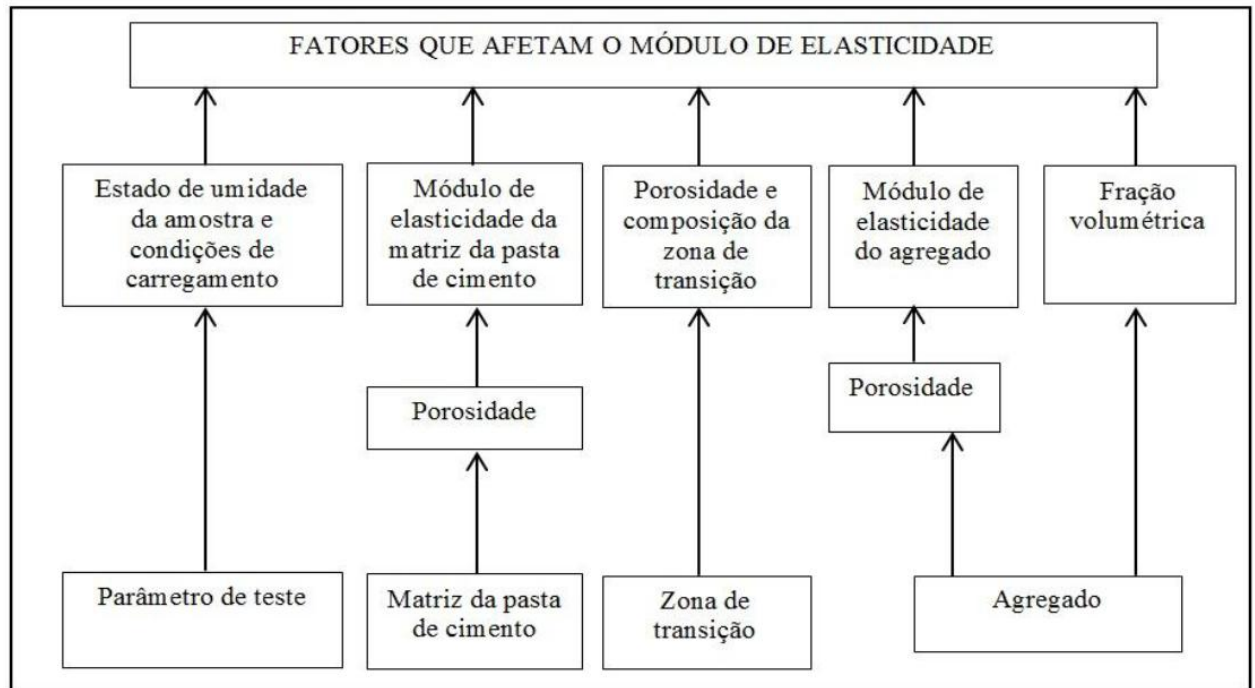
<b>Tipo de rocha</b>	<b>Valores do módulo de deformação (GPa)</b>
Granito, rochas vulcânicas e basalto	69 - 138
Arenitos, calcários e cascalhos	21 - 48
Agregados leves	7 - 28

(fonte: adaptado de MEHTA; MONTEIRO, 1994)

Além dos agregados, pode-se citar a matriz da pasta de cimento, a fragilidade da zona de transição dos materiais e parâmetros de ensaio como fatores que são de fundamental importância para o módulo de elasticidade do concreto. Com uma matriz menos porosa, consegue-se uma melhor qualidade da mesma e da zona de transição, sendo determinantes para o valor do módulo. Além disso, a idade de cura também merece destaque, visto que esse fator apresenta um grau de influência para o módulo de elasticidade maior que para a resistência, indicando maiores taxas de aumento em idades mais avançadas (MEHTA;

MONTEIRO, 1994). A figura 6 apresenta um resumo dos fatores que afetam o módulo de elasticidade do concreto.

Figura 6 - Resumo dos fatores influentes no módulo de elasticidade do concreto



(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 1994)

Leite (2001) afirma que os concretos produzidos com os agregados graúdos reciclados apresentam valores mais baixos quanto maiores a suas proporções nas misturas. Por ser um material bastante poroso, confirma o que foi descrito anteriormente, visto que agregados menos densos tendem a diminuir o valor do módulo do conjunto. A autora constata que mesmo com relações a/c mais baixas, com menor porosidade da matriz, a medida que aumenta a quantidade de agregado graúdo reciclado na mistura, diminuem os valores de módulo do concreto.

Embora seja consenso na bibliografia que a utilização de agregados graúdos reciclados sejam prejudiciais ao valores de módulo de elasticidade, Xiao et al. (2005)<sup>2</sup> citado por Cabral (2007) afirmam que as curvas tensão-deformação dos concretos produzidos com agregados reciclados são semelhantes aos mesmos produzidos com agregados naturais. Dessa forma, é

<sup>2</sup> XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, Ch. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. Cement and Concrete Research, Vol. 35, pg. 1187-1194, 2005.

possível estimar o comportamento desse material em relação ao módulo de deformação de acordo com a teoria da elasticidade apresentada pelos concretos convencionais.

### 3.2.3 Durabilidade

A durabilidade está diretamente ligada com o conceito de permeabilidade dos materiais. Esse conceito é definido como a facilidade dos líquidos ou gases penetrarem no concreto, sendo uma grande preocupação para o interior do material, visto que quanto mais vulnerável for o concreto, maior será a entrada de agentes agressivos, diminuindo a vida útil da estrutura (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Em condições normais e utilizando agregados naturais, a permeabilidade do concreto é definida pela porosidade. Ou seja, quanto menor a relação a/c, existirão menos poros na matriz e mais durável será a estrutura. Porém, a porosidade não define sozinha a permeabilidade do material. É necessário que haja um caminho que conecte os vazios do concreto, carregando os agentes agressivos mais rapidamente para o interior da estrutura. De fato é importante que haja uma baixa relação a/c para diminuir a permeabilidade, no entanto, a obtenção de um concreto mais denso também é uma forma de amenizar esse efeito. Para tanto, a utilização de agregados bem graduados, ou seja, de diferentes frações granulométricas se apresenta como uma solução para atenuar esses problemas (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Embora os agregados possuam valores bem menores de poros capilares em suas composições em relação às pastas de cimento, a introdução desses materiais nas misturas de concreto não comprovam uma melhora de comportamento do sistema. A adição dos agregados na pasta de cimento ou argamassa aumentam os valores de permeabilidade, de modo que quanto maior o tamanho do agregado, maior o coeficiente de permeabilidade do conjunto. Ao adicionar os agregados na mistura, a zona de transição formada com a pasta de cimento tende a fissurar, visto que, dependendo das características do agregado, essa interface é mais frágil nas primeiras idades, propiciando maiores interconexões entre os vazios do concreto, tornando mais permeável a estrutura (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Em relação aos agregados reciclados, Cabral (2007) constatou uma queda de desempenho de durabilidade dos concretos confeccionados com esses materiais em relação aos de agregados naturais, independente da relação a/c utilizada. O autor comenta que é possível adquirir um desempenho de durabilidade adequado de concretos com agregados reciclados desde que se



adote baixos valores de relação a/c e, conseqüentemente, diminuir a permeabilidade da estrutura.

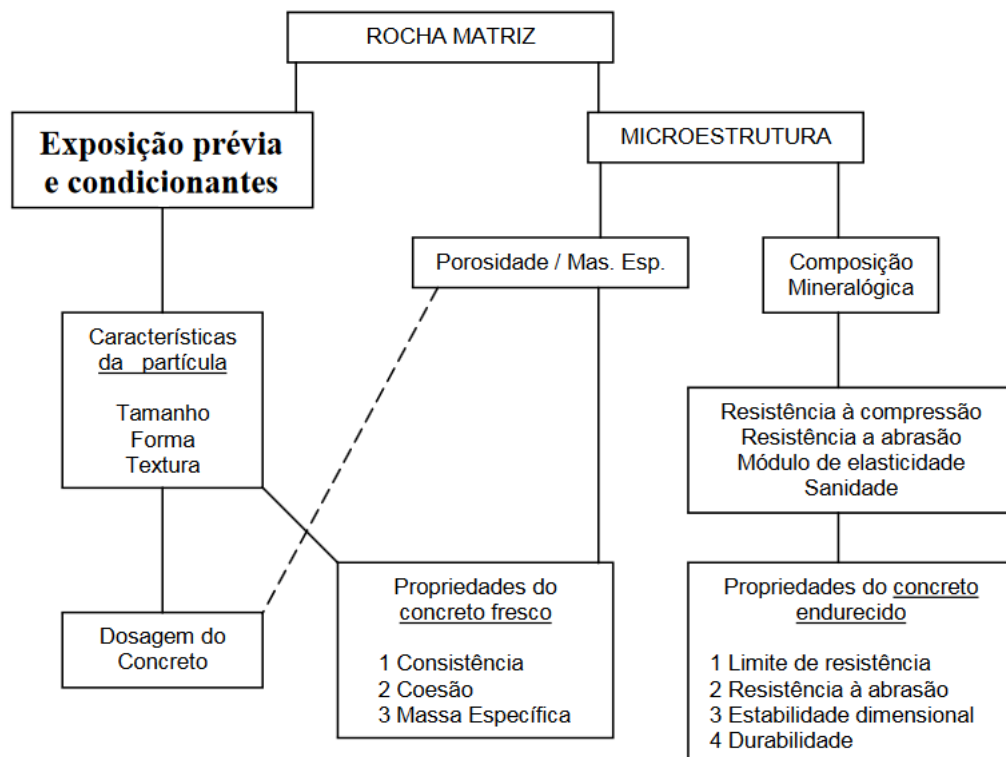
Segundo Buttler (2003), a argamassa que fica aderida ao agregado reciclado de concreto torna o concreto produzido mais propício a fissuras ocasionadas por retração por secagem. Em razão da presença desse elemento no agregado, o autor comenta que o concreto reciclado necessita de uma maior quantidade de água em relação ao de agregados naturais, ocasionando uma maior vulnerabilidade a esse problema.

### 3.3 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS

Conforme visto anteriormente, as características dos agregados são de fundamental importância para as propriedades dos concretos. Segundo Mehta e Monteiro (1994), a forma e a textura superficial das partículas, a composição granulométrica, a absorção de água e a resistência à compressão são fatores que derivam da rocha matriz do agregado, das condições de exposição e dos equipamentos utilizados no processo de beneficiamento antes do material se tornar um agregado.

Dessa forma, é essencial estudar cada propriedade do agregado e conhecer as suas influências nas características do concreto, a fim de otimizar a mistura e obter resultados mecânicos e de durabilidade mais satisfatórios. A figura 7 ilustra um digrama de como a microestrutura, condições prévias de exposição e as etapas do processo de fabricação do agregado influenciam as propriedades dos concretos, tanto no estado fresco quanto no endurecido.

Figura 7 - Diagrama ilustrativo da origem dos fatores dos agregados que caracterizam o concreto no estado fresco e endurecido



(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 1994)

### 3.3.1 Massa específica e massa unitária

Sabe-se que os agregados são os materiais mais volumosos nas matrizes de concreto, portanto é essencial quantificar esse volume ocupado para efeitos de dosagem. O parâmetro de massa específica relaciona a massa dos agregados e o volume ocupado pelo mesmo, incluindo os poros internos das partículas. Por sua vez, a massa unitária mede a massa referente ao agregado sobre o volume do mesmo somado aos vazios entre os grãos, uma vez que não é possível empacotar completamente as partículas dos agregados de modo que não existam vazios entre as mesmas (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A determinação da massa específica é importante para o cálculo da quantidade de materiais necessários na produção de concreto. Os valores da maioria dos agregados naturais variam entre 2,6 e 2,7 g/cm<sup>3</sup>, enquanto os agregados leves e artificiais podem apresentar uma maior variação destes valores. A massa unitária é um parâmetro utilizado nas conversões entre massa e volume (NEVILLE; BROOKS, 2013). Segundo Mehta e Monteiro (1994), os valores comuns dos agregados naturais variam entre 1,3 e 1,75 g/cm<sup>3</sup>.

Em relação aos agregados reciclados, a porosidade do material é um fator que influencia diretamente nos valores de massa específica. Segundo Buttler (2003), em RCD de concreto, a camada de argamassa aderida na superfície torna o agregado mais poroso, sendo responsável por valores mais baixos de massa específica em comparação aos agregados naturais, obtendo uma relação entre ambos de 0,86 e 0,89.

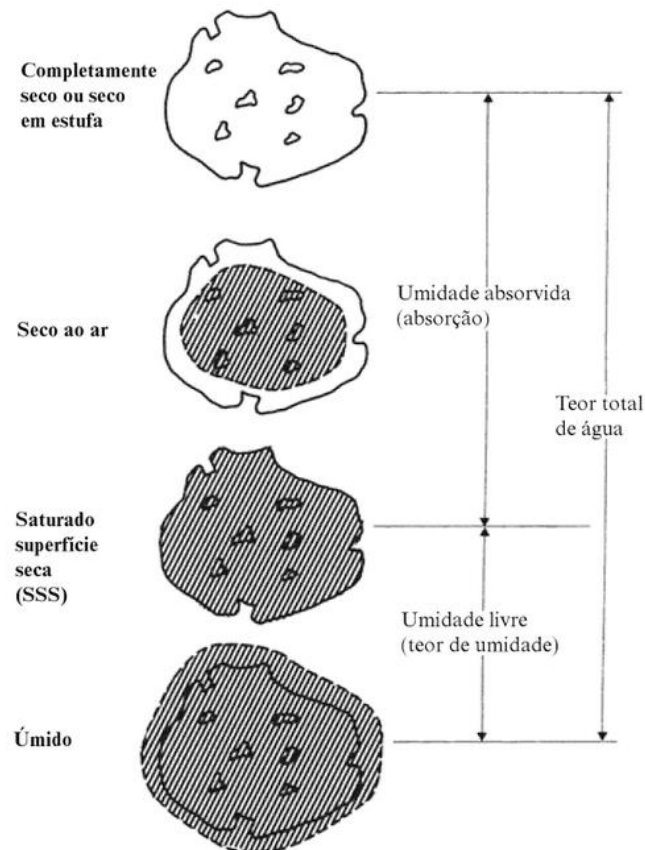
Leite (2001) também afirma que a porosidade do agregado é determinante para a redução dos valores de massa específica. A autora obteve valores de 4% e 19% menores em relação aos agregados naturais miúdos e graúdos, respectivamente. Em relação à massa unitária, foram encontrados 21% e 30% mais baixos para miúdos e graúdos, respectivamente. Além disso, foi observada a grande influência do agregado graúdo na massa específica do concreto devido a sua maior dimensão, de modo que quanto maior a quantidade de agregado graúdo reciclado, menor a massa específica do conjunto.

A massa específica do agregado reciclado, além da porosidade diferente em relação ao agregado natural, também se dá pela menor densidade dos mesmos. Em relação a massa unitária, além dos fatores citados, a forma irregular do agregado também contribui para o decréscimo do valor. De forma geral, a granulometria do material também é determinante para redução de ambos fatores (CABRAL, 2007).

### **3.3.2 Absorção**

A absorção está diretamente ligada ao número de poros presentes nos agregados. Dentre os estágios de umidade, a condição saturado superfície seca (SSS) define o quanto o agregado absorve de fato de água (NEVILLE; BROOKS, 2013). De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a quantidade de água em excesso além do necessário para o estágio SSS é denominada de umidade superficial. A figura 8 mostra um esquema dos estágios de umidade do agregado.

Figura 8 - Representação esquemática das condições de umidade dos agregados



(fonte: NEVILLE; BROOKS, 2013)

Fatores como capacidade de absorção, absorção efetiva e umidade superficial são indispensáveis em dosagens de concretos, permitindo a proporção correta dos valores de água e agregados necessários. Além disso, a capacidade de absorção reproduz indiretamente a porosidade do material e, portanto, pode-se presumir a sua resistência (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Dado também abordado por Neville e Brooks (2013) que afirmam que a porosidade, permeabilidade e absorção dos agregados influenciam na aderência entre os mesmos e a pasta de cimento e, portanto na resistência global, na massa específica, na estabilidade química, na resistência à abrasão e na resistência do concreto ao gelo e degelo.

Em agregados naturais, como o basalto, os valores de absorção variam entre 0,48 % e 1,26%, conforme pode ser observado na pesquisa de Rohden (2015). Em relação aos agregados reciclados, o fator absorção deve ser considerado com bastante atenção. Leite (2001) apresenta valores 8,60% e 4,95% de absorção para agregados miúdos e graúdos, respectivamente. A autora alerta os elevados valores destacados em relação aos agregados

naturais e, portanto, observa a necessidade de compensar a quantidade de água na mistura, de modo a evitar que diminuísse a trabalhabilidade do concreto.

Percebendo essa necessidade de água pelos agregados reciclados, a norma brasileira NBR 15116 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004) recomenda a utilização de uma técnica de pré-molhagem de 80% da taxa de absorção do agregado para produção de concretos, de modo a reduzir essa perda de água da mistura e atenuar os impactos sobre a trabalhabilidade. Vieira (2003) comenta que a utilização da técnica que fora posteriormente recomendada pela norma é de fundamental importância para adquirir concretos moldáveis e trabalháveis, uma vez que um erro na quantidade de água utilizada pode acarretar em uma mistura tanto saturada quanto seca, acarretando problemas em relação à porosidade do concreto.

Dessa forma, as pesquisas divergem de como aplicar essa técnica. Cabral (2007) aplicou o umedecimento do agregado 10 minutos antes de misturar na betoneira, de modo que neste tempo foi observado 80% de absorção de água total em um tempo de 24 horas. Lovato (2007) adotou um tempo de 15 minutos de pré-molhagem e, portanto, correspondeu a absorções de 70% e 50% para as amostras recolhidas. Cordeiro (2013) estudou diversas técnicas de saturação do agregado (20%, 40%, 60%, 80% e 100%), chegando à conclusão que o melhor resultado foi de 80% de absorção.

É consenso entre os pesquisadores a necessidade de uma pré-molhagem do agregado reciclado, a fim de reduzir os prejuízos causados pelos mesmos na mistura de concreto. No entanto, percebe-se que a heterogeneidade de composição do RCD é definitiva para determinar o seu umedecimento. Dessa forma, acredita-se que utilizar o valor de 80% de absorção de água recomendado pela norma, independente do tempo, é a técnica mais plausível a ser adotada, conseguindo manter uma padronização para as diferentes amostras do agregado. Assim, o material fica preenchido com água no seu interior e seco por fora, preservando a aderência do agregado junto à pasta de cimento.

### **3.3.3 Granulometria**

A análise granulométrica consiste em dividir as amostras dos agregados de mesma dimensão em suas devidas proporções, a fim de verificar a graduação do material ou a sua distribuição

de dimensões. Para determinação da granulometria do agregado, uma série de peneiras ficam dispostas em ordem decrescente, de modo que os materiais retidos em cada peneira representam uma dimensão maior do que a peneira em questão, mas menor que a peneira acima (NEVILLE; BROOKS, 2013). A série de peneiras utilizadas na composição granulométrica encontra-se na tabela 4, conforme a NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001).

Tabela 4 - Conjunto das malhas de peneiras sucessivas para determinação da composição granulométrica

<b>SÉRIE NORMAL</b>	<b>SÉRIE INTERMEDIÁRIA</b>
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
--	31,5 mm
--	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
0,60 mm	-
0,30 mm	-
0,15 mm	-

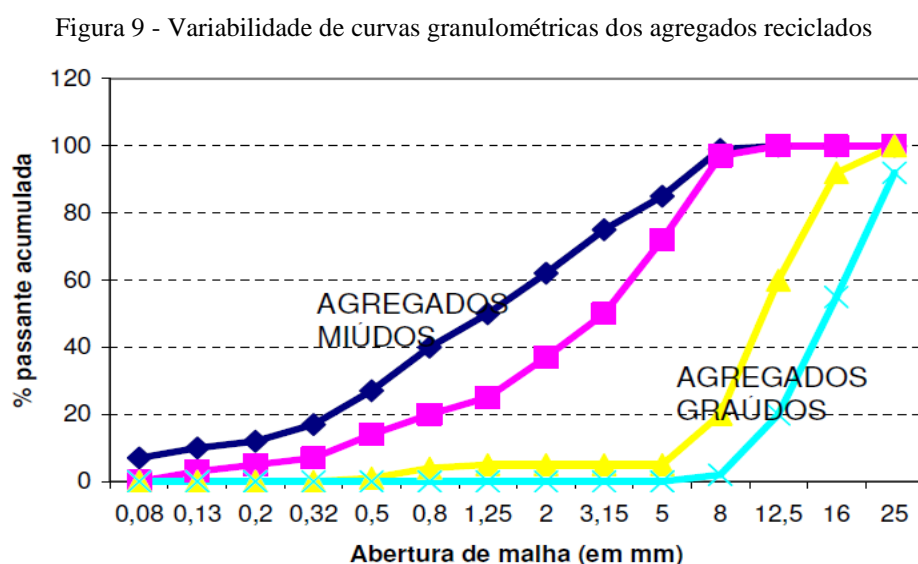
(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001)

O conhecimento dos limites granulométricos e as dimensões máximas dos agregados é de fundamental importância para o concreto, uma vez que podem influenciar diretamente no custo e na trabalhabilidade da mistura. Em relação aos agregados graúdos, quanto maior for a sua dimensão máxima, menor a sua área superficial e, conseqüentemente, menor a necessidade de pasta de cimento para cobrir as partículas. Esse efeito causa uma redução na necessidade de água e cimento e, portanto, no custo do concreto, sem causar prejuízos à trabalhabilidade e à resistência do conjunto. No entanto, partículas maiores tendem a aumentar o número de microfissuras na interface pasta de cimento e agregado, sendo prejudicial à resistência do concreto. Além disso, o tamanho das partículas devem estar de

acordo com as dimensões das fôrmas na qual o concreto irá ser produzido, bem como as armaduras que o mesmo irá cobrir (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Outra característica importante sobre a granulometria dos agregados é a variedade de dimensão. De acordo com Neville e Brooks (2013), as partículas retidos nas peneiras maiores se acomodam e, se não houver partículas menores, haverá vazios entre as mesmas. Esse conceito pode ser definido como granulometria descontínua, ou seja, há ausência de tamanhos de grãos na curva granulométrica do agregado, de modo que existam vazios entre eles ao se disporem na matriz do concreto. Mehta e Monteiro (1994) afirmam que quando o agregado possui excesso ou há falta de algum tamanho de partícula, as misturas de concreto tendem a ser menos trabalháveis e econômicas.

Em função das diferentes composições do RCD, a granulometria dos agregados também é variável (CORRÊA, 2014). Segundo Sánchez (2004), a granulometria dos agregados reciclados depende diretamente dos processos de beneficiamento do material, principalmente o método de britagem utilizado. Angulo (2000) afirma que, mesmo mantendo a regulagem do aparelho utilizado no beneficiamento, a granulometria do agregado é variável, uma vez que depende também das diferentes fases e composições do resíduo de origem. A figura 9 representa as diferentes curvas granulométricas dos agregados reciclados.



(fonte: Quebaud-Buyle-Bodin, 1999<sup>3</sup> apud Angulo, 2000)

<sup>3</sup> QUEBAUD, M.R.; BUYLE-BODIN, F. A reciclagem de materiais de demolição: utilização dos agregados reciclados no concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO (CBC), 5. São Paulo, 1999. **Anais.** São Paulo, 1999. 14p

Leite (2001) obteve curvas granulométricas contínuas em seus agregados reciclados, tanto miúdo quanto gráudo. A autora observa aspectos positivos em sua pesquisa em relação a esse fato, de modo que os agregados obtiveram uma boa compacidade na matriz do concreto.

Cabral (2007) ajustou o comportamento dos agregados reciclados presentes em seu experimento, de modo que possuíam a mesma distribuição granulométrica dos agregados naturais e, dessa forma, concluiu que as diferenças de resultados dos concretos se deu por características como a forma e a porosidade dos agregados.

### **3.3.4 Forma e Textura**

Os índices de forma e textura são de fundamental importância para as propriedades do concreto tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. A forma dos agregados britados dependem, basicamente, das características da rocha mãe, do tipo de britador e de sua taxa de redução, isto é, a relação de tamanho do material final comparado com o inicial. A textura superficial, por sua vez, depende da dureza, da dimensão dos grãos e da característica de porosidade da rocha mãe, além das forças atuantes sobre a superfície das partículas (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A forma e a textura são determinantes para conhecer a demanda de água da mistura, bem como a trabalhabilidade do concreto (NEVILLE; BROOKS, 2013). Segundo Mehta e Monteiro (1994), partículas angulosas (vértices e arestas bem definidos), lamelares ou achatadas (espessuras pequenas em relação a outras dimensões) e alongadas (comprimento maior que as outras duas dimensões) são caracterizadas por possuírem grande área específica volumétrica e, portanto, demandam uma maior quantidade de água. Já as partículas arredondadas ou esféricas possuem baixo valor de área específica, necessitando de menos água na mistura.

Em relação à textura, a caracterização do material se dá através do quanto a partícula é lisa ou áspera. Agregados que possuem uma superfície mais áspera necessitam de mais pasta de cimento para mistura trabalháveis, elevando o custo, em relação aos agregados mais lisos. No entanto, grãos ásperos podem influenciar positivamente na aderência entre a pasta de cimento e o agregado, sendo um fator importante para os valores de resistência dos concretos, principalmente nas primeiras idades (METHA; MONTEIRO, 1994).



Segundo Cordeiro (2013), os agregados reciclados de concreto possuem uma camada de argamassa aderida nas partículas, contribuindo para uma textura áspera e uma maior porosidade. Leite (2001) afirma que essa rugosidade, juntamente com sua forma mais angulosa, colabora para uma maior aderência na zona de transição pasta de cimento e o agregado e, conseqüentemente, melhorando as propriedades mecânicas do concreto. Sánchez (2004) constata que a forma angulosa do agregado reciclado é mais acentuada em relação ao natural. Além disso, a autora afirma que o sistema de britagem influencia na forma do agregado, bem como a origem do resíduo.

Portanto, existem vantagens e desvantagens em relação à forma e à textura dos agregados reciclados. A melhora da aderência e das propriedades no estado endurecido é um fator positivo para as produções de concreto. Porém, segundo Leite (2001), essa forma irregular e a textura mais áspera do agregado prejudica as características do concreto no estado fresco, demandando mais água e pasta para cobrir as partículas e manter uma trabalhabilidade adequada, de modo que o custo do conjunto é maior em relação aos agregados naturais.

### **3.3.5 Impurezas**

Sabe-se que o RCD é recolhido nas obras e, embora se tenha uma coleta seletiva nas mesmas, o material pode vir contaminado com outras substâncias que são prejudiciais às propriedades dos concretos. Segundo Lovato (2007), as impurezas que podem estar presentes nos agregados são as matérias orgânicas ou solos argilosos, materiais betuminosos, gesso, vidro, metais, cloretos e substâncias orgânicas.

As matérias orgânicas, que são constituídas por matéria vegetal na forma de húmus ou argila orgânica, são substâncias que prejudicam o processo de hidratação do concreto, danificando a sua resistência. São materiais facilmente retirados através de lavagem. Essa quantidade de argila que pode estar presente junto ao agregado, por ser um material fino, exige uma demanda considerável de água para molhagem, podendo prejudicar a trabalhabilidade da mistura (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Segundo Sánchez (2004), além dos danos causados na resistência do concreto, as impurezas presentes nos agregados podem trazer outros tipos de prejuízos, entre elas:

- o vidro favorece a reação álcali agregado;
- o gesso pode originar reação expansiva por sulfatos;
- a madeira e o papel são instáveis nos ciclos de molhagem e secagem;
- os solos argilosos demandam mais água na mistura, causando retração no concreto;
- a presença de metais pode causar manchas de corrosão na superfície dos concretos.

Leite (2001) afirma que a origem do resíduo é determinante para saber quais impurezas podem compor o resíduo e se é possível utilizá-lo como agregado nos concretos. A autora sugere que a retirada das substâncias deletérias devem ser retiradas de maneira instantânea, alertando que esses cuidados torna o processo mais caro. Lovato (2007) comenta que a Resolução N° 307 (CONAMA, 2002) exige a separação dos resíduos através das classes por ela estabelecida. A autora afirma que esse processo poderia evitar maiores custos posteriores e tornar mais viável a produção de concretos com agregados reciclados.

### 3.4 JIGAGEM

Sabe-se que a utilização de agregados reciclados em concretos apresentam grandes potenciais e, se forem tomados os devidos cuidados, pode-se utilizar esses materiais em maiores escalas de produção. No entanto, a variabilidade de comportamento e a heterogeneidade de composições ainda são entraves para aplicá-los em maiores quantidades. Segundo Lovato (2007), controlar essa não uniformidade de desempenho desses materiais é de fundamental importância para uma maior confiabilidade de resultados.

Portanto, a separação desses agregados através de sua densidade por equipamentos especiais pode ser um dos métodos para reduzir a variabilidade e relacionar as partículas através de sua porosidade e desempenhos mecânicos (ANGULO, 2005).

Dentre os métodos de separação, a jigagem se apresenta como uma solução para esse problema. Segundo Sampaio e Tavares (2005), o método pode ser definido como:

Jigagem é um processo de separação hidráulica que consiste da repetida expansão (dilatação) e contração (compactação) vertical de um leito de partículas pelo movimento pulsante da água. O resultado é a estratificação do leito, que corresponde à separação das partículas em camadas ou estratos de densidades crescente desde o topo até a base.

Os jigues são muito utilizados devido a sua economia em relação aos outros equipamentos. Além do baixo custo, pode-se citar a sua alta capacidade, a facilidade de operação do maquinário e alta diversidade de granulometrias que podem alimentar o equipamento, permitindo facilitar o fluxograma de beneficiamento dos materiais desejados (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

Na maioria dos casos, o jigue utiliza a água como fluido separador (CARRIJO; FIGUEIREDO, 2005), de modo que aplicada sob pressão nas partículas faz com que as mesmas caiam com velocidades distintas devido a diferença de massa específica de cada material (MOREIRA, 2010). Quanto à aplicação do método de jigagem úmida, Carrijo e Figueiredo (2005) comentam o elevado consumo de água como desvantagem desse processo. Além disso, em relação à aplicação desse método para separar os agregados reciclados por densidade, Angulo (2005) comenta que pelo fato desses materiais possuírem muitos finos devido aos processos anteriores do beneficiamento, quando for aplicada a jigagem úmida, causaria uma grande geração de lama.

Dessa forma, o método de separação a seco, através do jigue pneumático, se apresenta como uma solução aos problemas de jigagem úmida. Sampaio e Tavares (2005) afirmam que o funcionamento do equipamento tem a mesma premissa que o anterior, mudando apenas o fluido separador. Segundo os autores, a estratificação do material é resultado do intenso fluxo de ar no aparelho, de modo que as partículas mais densas ficam no fundo do leito, enquanto as mais leves ficam acima.

Diferentemente da jigagem úmida, os equipamentos do processo a seco não necessitam de filtros, secadores e outros aparelhos posteriores do deságue e, portanto, possuem um custo menor. Pode-se citar também que a ausência de líquidos no processo evita os riscos de contaminações posteriores ao material jigado. Além disso, possuem maiores capacidades de produção, uma vez que as partículas de ar se movem cerca de 100 vezes mais rápido que as de água. Esse fato permite que o equipamento possua menores dimensões (SAMPAIO; TAVARES, 2005). Angulo (2005) cita as vantagens ambientais do processo em relação à utilização de RCD que, além de economizar os gastos de água pelo equipamento, evita a formação de lama anteriormente comentada no caso de jigagem úmida.

No entanto, o jigue pneumático também possui algumas desvantagens. Sampaio e Tavares (2005) destacam a baixa eficiência do processo em relação ao caso úmido, uma vez que possui uma maior sensibilidade e uma menor precisão de separação. Além disso, os autores alertam que, com a diminuição das granulometrias, ocorre uma diminuição ainda maior da eficiência, de modo que para beneficiamentos de carvão e minerais pesados, por exemplo, torna-se inviável a utilização do processo para grãos menores que 0,6mm e 0,2mm, respectivamente.

Algumas pesquisas já vem avaliando o desempenho de separação de RCD através do jigue pneumático. Carrijo (2005) estudou o comportamento mecânico de concretos moldados com agregados reciclados de diferentes densidades, alegando que este poderia ser o seu principal fator de diferenciação. A autora comenta que a utilização de agregados de RCD para produção de concretos estruturais é uma técnica perfeitamente viável se for implantado um sistema de separação densitária, como o jigue. Além disso, é constatado que concretos com agregados de menores densidades possuem desempenhos mecânicos inferiores, visto que esse fato está diretamente ligado à porosidade do material. A autora ainda salienta que a faixa de densidade dos agregados reciclados entre 2,2 g/cm<sup>3</sup> e 2,5 g/cm<sup>3</sup> possui comportamento similar ao de agregados naturais.

Sampaio et al. (2015) avaliaram o desempenho de separação do jigue pneumático com agregados reciclados compostos de partículas de concreto, tijolo e gesso. A ideia da pesquisa era separar os contaminantes de gesso dos constituintes de concreto, de modo a viabilizar sua utilização futura. A aplicação da jigagem a seco em escala industrial para esse fim é tratada como promissora pelos autores, uma vez que a estratificação bem definida dos materiais, com concretos na camada inferior, tijolos na camada média e gesso na camada superior, permitiu esse tipo de afirmação. Além disso, a redução da quantidade de gesso nas partículas de concreto reduziu cerca de 25 vezes, chegando a valores aceitáveis para a utilização deste com agregado.

Zortea F. (2014) testou o método de jigagem a seco para avaliar a sua eficácia na separação de resíduos de materiais cerâmicos reciclados. O autor salienta que o aparelho não separou os materiais apenas pela densidade, mas também pela forma e pela granulometria dos grãos. Esse fato foi explicado pela influência do efeito de borda do equipamento na separação do material, de modo que foi percebido visualmente que as partículas mais grossas ocupavam o interior da

camada, enquanto as mais finas estavam nas bordas do compartimento. A justificativa desse comportamento está ligada a não uniformidade de aspersão de ar sob pressão sobre toda a camada, uma vez que as regiões periféricas obtiveram menor pressão de sustentação devido ao atrito com as bordas da camada.

Zortea J. (2014) decidiu avaliar o comportamento de concretos produzidos com agregados reciclados, cujos contaminantes foram removidos através do método de jigagem a seco. O autor salienta que a separação de contaminantes de gesso pelo processo foi bastante eficiente. No entanto, o vidro não obteve o mesmo sucesso, sendo encontrado em todas as camadas. Da mesma forma que a pesquisa anteriormente citada, o efeito de borda também foi constatado nesse experimento, de modo que haviam partículas de gesso, mesmo em quantidade reduzida, em outras camadas nas proximidades das paredes do compartimento, constatando a menor pressão de ar nessas regiões.

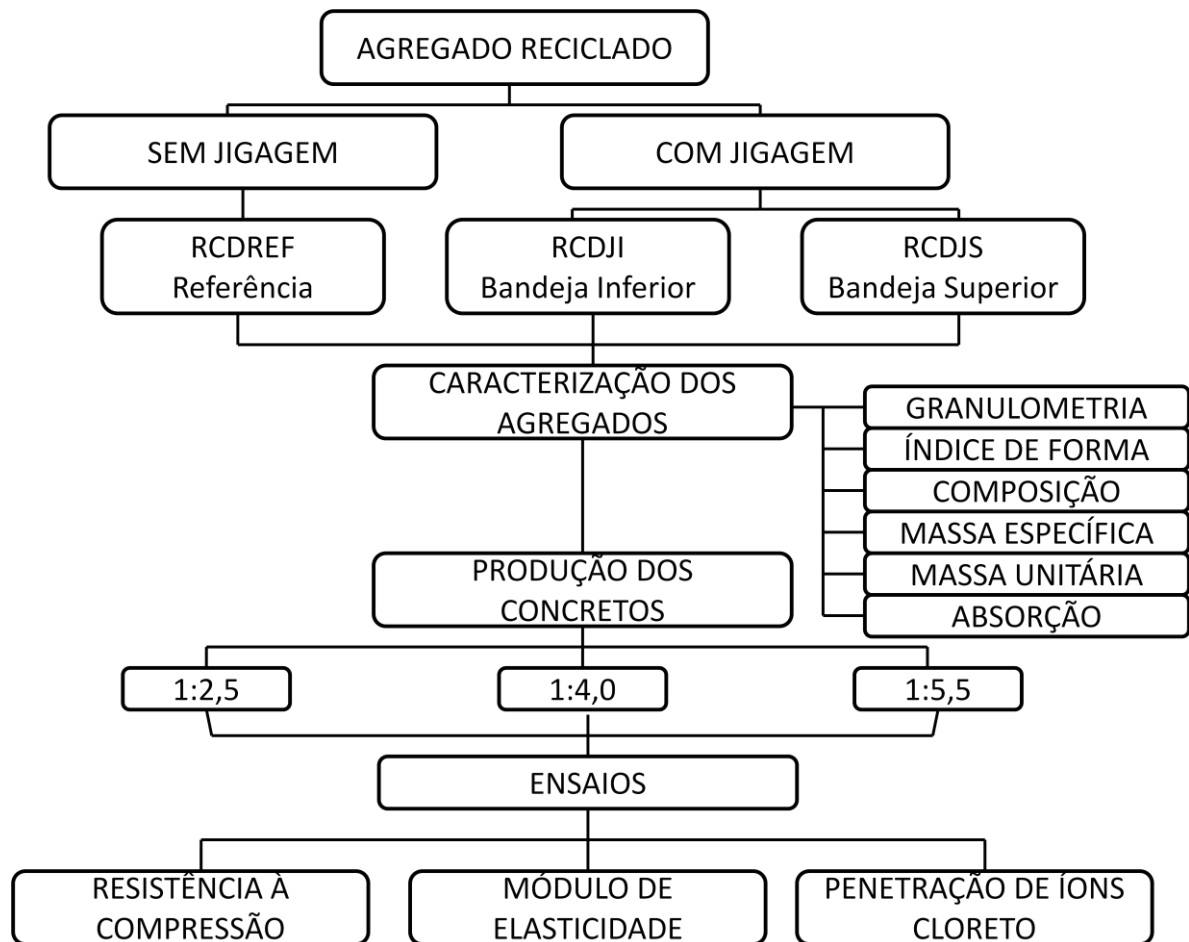
Corrêa (2014) utilizou o jigue pneumático para separar os agregados reciclados a fim de reduzir a variabilidade de resultados. O autor salienta a falta de precisão do equipamento com partículas de densidades próximas, a influência da forma e da granulometria dos grãos na separação e a interferência das paredes do equipamento no processo. Desse modo, o autor não verificou a eficiência do equipamento para reduzir a variabilidade do RCD em ensaios de resistência à compressão e à tração. No entanto, em relação ao módulo de elasticidade obteve melhores resultados menos variáveis, de modo que a densidade é um parâmetro importante para essa propriedade.

## 4 PLANO EXPERIMENTAL

De modo a atender todos os objetivos traçados no item 2, foi elaborado um plano experimental que verificasse o comportamento do RCD em relação à caracterização desse material como agregado e em produções de concreto, comparando os resultados antes e após a utilização do jigue pneumático como meio de separação densimétrica, analisando a variabilidade dos valores obtidos.

Portanto, foi analisado o comportamento do agregado reciclado de referência (RCDREF), do agregado proveniente da bandeja superior do processo de jigagem à seco (RCDJS) e, por fim, do oriundo da bandeja inferior do processo (RCDJI). Diante dessas três variedades do agregado reciclado, definiu-se, para cada um deles, um traço pobre (1:5,5), intermediário (1:4,0) e rico (1:2,5) de modo a obter a curva de dosagem e comparar cada situação. A figura 10 ilustra o plano experimental desse trabalho.

Figura 10 - Representação esquemática do plano experimental do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

Os itens a seguir descrevem todas as etapas do trabalho, desde a etapa de recolhimento do material até a moldagem dos corpos de prova de concreto. Cada passo realizado foi escolhido de modo a complementar o conteúdo de trabalhos anteriores, sendo determinante para um melhor aprendizado do tema proposto. Vale destacar que essa pesquisa foi desenvolvida concomitantemente com uma dissertação de Malysz (2018).

## 4.1 COLETA DAS AMOSTRAS DO RESÍDUO

O início do plano experimental se dá pela coleta do RCD em forma de agregado para estudar o seu comportamento. Este é proveniente de um aterro (figura 11) localizado na cidade de Montenegro, região metropolitana de Porto Alegre, o qual recolhe entulhos de diferentes obras, demolições e reformas na cidade e arredores.

A empresa que coleta os resíduos possui um britador que fornece o RCD em forma de agregado graúdo na faixa granulométrica entre 4,8mm e 25mm. Dessa forma, o recolhimento do material já em forma de brita e peneirado foi um facilitador, de modo que as etapas de beneficiamento do resíduo foram dispensadas nesse trabalho.

A região de Montenegro é caracterizada por ter um grande número de casas e poucos edifícios altos. Sendo assim, os materiais se caracterizam por ter resistência à compressão mais baixas por não haver estruturas que sejam muito solicitadas. Desse modo, destaca-se visualmente um grande número de materiais cerâmicos, argamassas, rochas e britas de diferentes origens, concretos e algumas impurezas, como vidro, madeira, plástico, gesso, telhas de fibrocimento, entre outras.



Figura 11 - Local de coleta do material para a plano experimental



(fonte: elaborado pelo autor)

## 4.2 PENEIRAMENTO E TRIAGEM

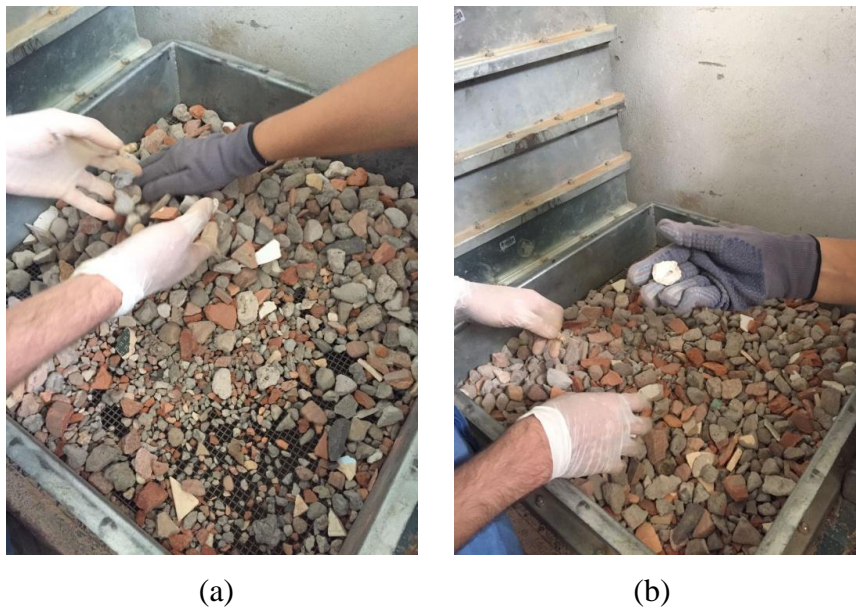
Após a coleta, o material foi levado para o Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC/ NORIE - UFRGS), onde foi desenvolvido a maior parte do estudo experimental. Separado em sacos de aproximadamente 25 kg, o resíduo ficou protegido dentro do laboratório, evitando contato com a umidade.

Embora a empresa recicladora já tivesse britado e peneirado o material, a primeira etapa da pesquisa dentro do laboratório foi garantir que o tamanho do agregado estivesse entre 4,8mm e 25mm, faixa granulométrica escolhida para a realização do trabalho. Desse modo, foram utilizadas peneiras vibratórias para esse fim. Vale destacar que, com os processos de manuseio e transporte do RCD, obteve-se uma grande quantidade de materiais finos passantes na peneira 4,8mm.

Conforme mencionado na revisão bibliográfica, a resolução nº 307 do Conama exige que as construtoras separem na obra os resíduos conforme suas classes. Porém, essa imposição não é respeitada pela maioria dos entulhos que são coletados pela empresa em questão, uma vez que as próprias obras não separam corretamente o material. Além disso, muitas vezes os containers ficam em locais externos às construções, de modo que as pessoas acabam despejando rejeitos domésticos, como se fosse lixo comum. A empresa faz uma triagem no próprio local, porém, mesmo assim, havia resíduos indesejados junto ao agregado coletado.

Dessa forma, concomitantemente ao processo de peneiramento, foi feita uma separação do material coletado, retirando as impurezas descritas no item 3.3.5, ilustrado na figura 12.

Figura 12 - Peneiramento e triagem do material coletado (a) peneiramento mecânico (b) retirada de impurezas



(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.3 QUARTEAMENTO

Com o material peneirado e separado, a etapa seguinte consistiu em homogeneizar as partículas do agregado, de modo que todas as amostras para os ensaios posteriores sejam representativas. Dessa forma, espalhou-se todo o material em um local seco e quarteou o monte, de acordo com a NBR NM 27 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001), inúmeras vezes até atingir a massa de aproximadamente 25kg para cada amostra. Esse procedimento é essencial para garantir a uniformidade e, consequentemente,

confiabilidade dos resultados, uma vez que o comportamento das amostras tende a ser mais estável.

## 4.4 JIGAGEM

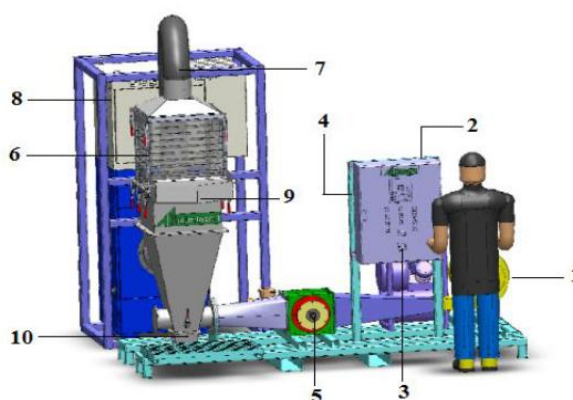
Posteriormente ao processo de quarteamento, os agregados foram levados ao Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM), onde ocorreu a separação por densidade do material no jigue pneumático.

### 4.4.1 Descrição do equipamento

O equipamento empregado nessa pesquisa é utilizado principalmente pela engenharia de minas para retirar as impurezas juntas aos minerais. O presente estudo visa utilizar o jigue pneumático para separar os materiais mais densos presentes na composição do RCD coletado dos menos densos, de modo a diminuir a grande variedade de composição de agregados reciclados. O jigue pneumático é nomeado como *All air s-500*, o qual está ilustrado em um croqui esquemático de seus componentes na figura 13 e descritos na figura 14.

Figura 13 - Componentes do jigue pneumático utilizado na pesquisa

Ref	Item	Ref	Item
1	Ventilador centrífugo	6	Câmara de estratificação
2	Quadro de comando	7	Bocal de exaustão
3	Chave geral	8	Filtro de mangas
4	Fieldlogger	9	Coletor da câmara
5	Válvula rotativa	10	Coletor de fundo



(fonte: trabalho não publicado<sup>4</sup>)

<sup>4</sup>Página 3 *All air S-500 - modo de operação* elaborado por Weslei Monteiro Ambrós em maio de 2014, Porto Alegre

Figura 14 - Ficha técnica do jigue pneumático

AllAir S-500 (AllMineral®)				
Câmara de estratificação	Comprimento (ext.)	532 mm	Leito com tela perfurada 530 mm x 530 mm 6 engates na base x 4 engates no topo 11 compartimentos de acrílico Maiores - 5 x 50 mm Menores - 6 x 25 mm	
	Largura (ext.)	532 mm		
	Altura (ext.)	550 mm		
	Espessura	15 mm		
	Área efetiva de jigagem	0,27 m <sup>2</sup>		
Ventilador centrífugo (soprador)	Fabricante	COMBIMAC	Massa	200 kg
	Tipo	49631/B1Y1	Pressão estática	6000 Pa (máx.)
	Vazão	73 m <sup>3</sup> /min	Massa específica	1,22 kg/m <sup>3</sup>
	n	2915 rpm	Potência	15 kW
	n (máx)	3000 rpm		
Motor do ventilador	Fabricante	SIEMENS	Massa	75 kg
	Tipo	IEC/EN 60034	n	2955 rpm
	Condições de operação	230 V	Fator de potência	0,88
		47,5 A	Potência	15 kW
		50 Hz	Rendimento	90,30%
Motor da válvula rotativa	Fabricante	LENZE	Massa	-
	Tipo	EN 60034	n	1435 rpm
	Condições de operação	220 V	Fator de potência	0,76
		3,3 A	Potência	1,5 kW
		50 Hz	Rendimento	82,80%
Coletor de pó	Fabricante	TEKA GmbH	Massa	220 kg
	Tipo	Filtercube 2H	Vazão	5000 m <sup>3</sup> /h
	Condições de operação	220 V	Pressão estática	3000 Pa (máx.)
		5,2 A	Potência	4 kW
		50 Hz		
Quadro de comando	Fabricante	AllMineral	Chave principal	vermelho-amarelo
	Tipo	CM 5117.500	Liga/desliga/falha	verde/vermelho
	Dimensões	800 mm	2 comandos de ajuste com painel indicador	
		1200 mm	Condições de operação	220 V
		400 mm		50 Hz

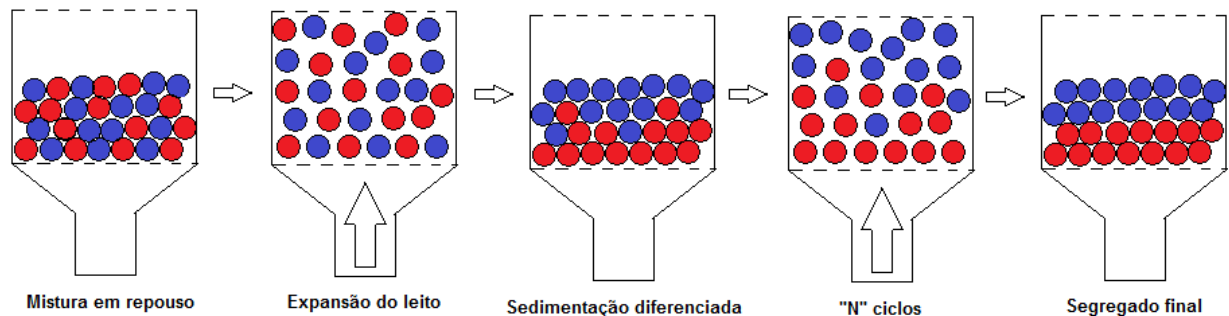
(fonte: trabalho não publicado<sup>5</sup>)

Basicamente, o princípio de funcionamento do aparelho consiste no processo de jigagem, que se dá pelo movimento pulsante das partículas através de repetidas expansões e contrações do leito. Sendo assim, ocorre a separação dos materiais por densidades de forma crescente do topo à base (figura 15), de modo que os agregados mais densos se encontram na parte inferior da câmara de estratificação e os menos densos na região superior (TRABALHO NÃO PUBLICADO<sup>6</sup>).

<sup>5</sup>Página 4 All air S-500 - modo de operação elaborado por Weslei Monteiro Ambrós em maio de 2014, Porto Alegre

<sup>6</sup>Página 5 All air S-500 - modo de operação elaborado por Weslei Monteiro Ambrós em maio de 2014, Porto Alegre

Figura 15 - Representação esquemática da segregação dos materiais



(fonte: trabalho não publicado<sup>7</sup>)

Destaca-se o tamanho e o formato da partícula como parâmetros a serem considerados na estratificação das partículas. Recomenda-se utilizar uma distribuição granulométrica mais limitada, não possuindo tamanhos menores que 1 mm e maiores que 40 mm (TRABALHO NÃO PUBLICADO<sup>8</sup>).

#### 4.4.2 Realização do ensaio

As primeiras diretrizes definidas no processo de jigagem a seco foram a quantidade de material, o número de bandejas e o tamanho das mesmas. Como já havia separado os agregados em sacos de 25 kg, decidiu-se, por praticidade, processar amostras com dois sacos, 50kg, a cada ciclo de operação. A câmara de estratificação do jigue pneumático utilizado possui bandejas de acrílico com seção quadrada de dimensões de 532 x 532 mm, com altura de 50 mm e 25 mm. Decidiu-se, portanto, utilizar quatro bandejas com 25 mm de altura, visto que a quantidade de material colocada na câmara preencheu exatamente essa distribuição nos compartimentos. Assim, separou-se os agregados oriundos da bandeja superior e inferior em sacos diferentes, descartando o material presente nas intermediárias, conforme ilustra a figura 16.

<sup>7</sup>Página 5 **All air S-500 - modo de operação** elaborado por Weslei Monteiro Ambrós em maio de 2014, Porto Alegre

<sup>8</sup>Páginas 5, 6 e 7 **All air S-500 - modo de operação** elaborado por Weslei Monteiro Ambrós em maio de 2014, Porto Alegre



Figura 16 - Modelo de estratificação da câmara utilizado no trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

As configurações no quadro de comando foram definidas através de testes com as amostras, chegando nos seguintes valores:

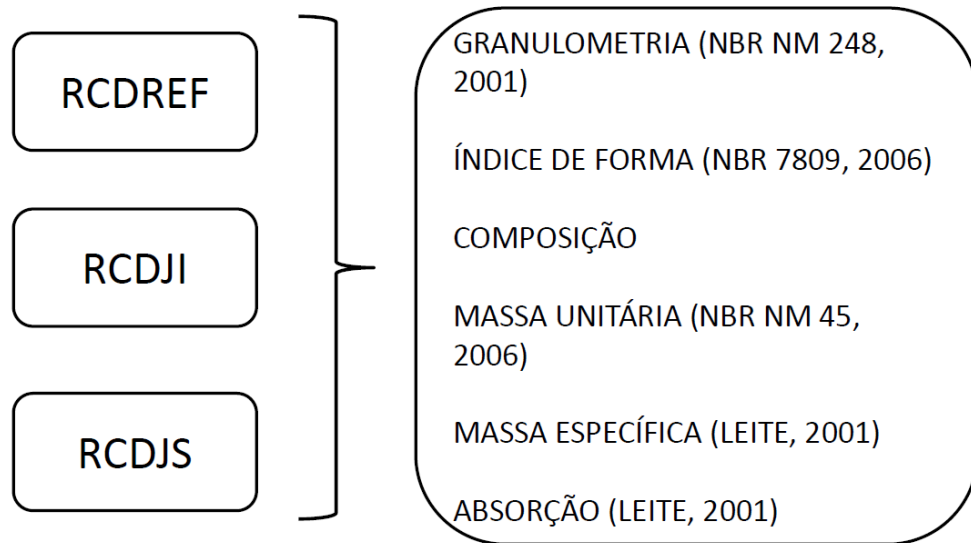
- a) Tempo de ensaio: 120 segundos;
- b) Frequência: 180 rpm;
- c) Taxa de expansão do leito: 70%.

#### 4.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO

Terminadas as etapas preliminares, iniciou-se a caracterização do agregado. Conforme dito anteriormente, essa fase é de fundamental importância para conhecer o RCD e prever o seu comportamento quando da sua utilização em concretos.

Os itens a seguir descrevem quais foram os ensaios realizados, bem como as normas e referências utilizadas (figura 17).

Figura 17 - Ensaios de caracterização realizados e suas respectivas normas



(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.5.1 Granulometria e módulo de finura

Os primeiros ensaios de caracterização realizados foram a composição granulométrica dos agregados e os respectivos módulos de finura através da NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2001). O ensaio consiste em peneirar o agregado, previamente seco em estufa, nas malhas das séries normais e intermediárias e na pesagem das massas retidas em cada uma dessas peneiras, conforme mostra a figura 18. Como já se conhecia a dimensão máxima do agregado, #25mm, separou-se duas amostras de aproximadamente 10kg para a realização do ensaio. Ao avaliar os resultados, conferiu-se a diferença mínima das porcentagens individuais das massas retidas menor que 4% entre as duas amostras, não sendo necessária a repetição do ensaio.

Figura 18 - Aspecto visual do agregado de RCD sendo submetidos ao ensaio de granulometria



(fonte: elaborado pelo autor)

Após a realização do ensaio com os agregados RCDREF, RCDJI E RCDJS, comparou-se graficamente, ilustrado na figura 19 e na tabela 5, as curvas granulométricas e os módulos de finura, respectivamente, provenientes das três amostras. Adendo ao gráfico está esboçada a linha que representa a zona ótima granulométrica determinada pela NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009).

Tabela 5 - Influência do processo de jigagem a seco no módulo de finura dos agregados graúdos reciclados

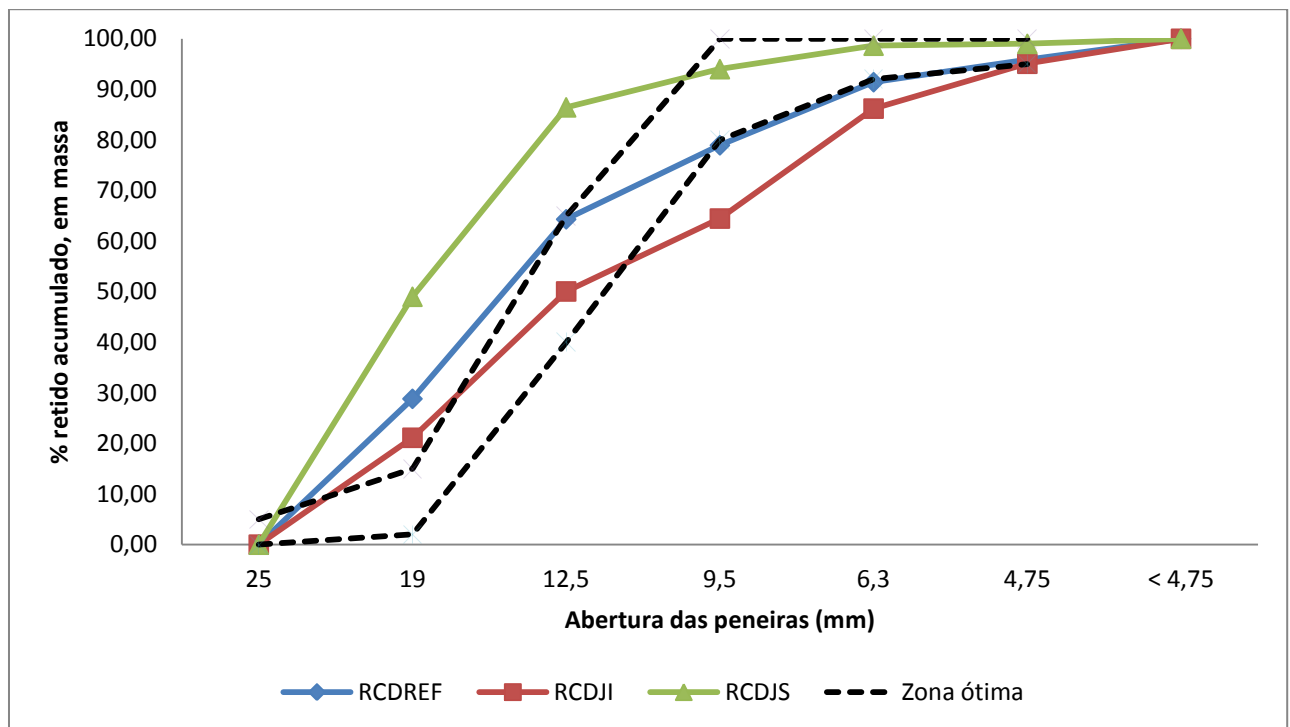
<b>Material</b>	<b>Dimensão máxima (mm)</b>	<b>Módulo de finura</b>
RCDREF	25	7,08
RCDJI	25	6,86
RCDJS	25	7,43

(fonte: elaborado pelo autor)

Nota-se que o processo de jigagem influenciou no módulo de finura dos agregados reciclados. Esse parâmetro representa o tamanho da partícula em um determinado intervalo, de modo que quanto maior esse valor, mais partículas grosseiras estão presentes na amostra. Desse modo, nota-se que o RCDJI possui grãos menores em sua composição, e o RCDJS, grãos mais grosseiros. Esse fato foi possível visualizar também na figura 19.



Figura 19 - Influência do processo de jigagem a seco na granulometria dos agregados graúdos reciclados



(fonte: elaborado pelo autor)

A primeira análise da figura 19 consiste na visível diferença de composições granulométricas antes e após o processo de jigagem à seco do material. O RCDREF, esboçado na curva intermediária, apresenta uma maior concentração de agregados nas peneiras #19 e #12,5. O RCDJI exibe uma quantidade de material melhor distribuída entre os grãos. O RCDJS, por sua vez, possui uma grande quantidade de material acumulado nas primeiras peneiras, sendo quase 50% do material acumulado já na malha #19. Vale destacar que, antes e depois do processo de jigagem a seco, as curvas granulométricas esboçadas não estiveram totalmente presentes na zona ótima determinada pela norma, o que corresponde com o trabalho de Cabral (2007). Independente dos agregados não estarem inclusos na zona ótima da norma, optou-se por utilizar o agregado da mesma maneira que fora coletado da fonte, de modo a manter as suas características.

Dessa forma, a primeira conclusão do processo de jigagem à seco é a modificação da distribuição granulométrica do agregado nas diferentes bandejas, como pode ser observado nas figuras 20a (RCDJI) e 20b (RCDJS). Acredita-se que, com a agitação dos grãos dentro do equipamento, os agregados de menores dimensões vão se encaixando nos vazios dos materiais

presentes nas bandejas inferiores. Essa compactação dentro do processo resulta em uma distribuição granulométrica melhor distribuída nas camadas inferiores. Em contrapartida, as bandejas superiores apresentam uma maior quantidade de material grosseiro.

Figura 20 - Comparativos dos grãos pós processo de jigagem (a) Grãos de RCDJI  
(b) Grãos de RCDJS



(a)



(b)

(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.5.2 Índice de forma

O ensaio de índice de forma, determinado pela NBR 7809 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), tem como objetivo verificar a relação do comprimento e da espessura do agregado, sendo a maior e a menor medida do grão, respectivamente.

Esse ensaio é realizado posteriormente ao de composição granulométrica, de modo que são utilizados os grãos já divididos em seus respectivos tamanhos. Desprezando-se o material passante na malha #9,5, mede-se 200 grãos em cada uma das peneiras superiores, obtendo o resultado a partir de uma média ponderada.

Tabela 6 - Influência do processo de jigagem a seco no índice de forma dos agregados graúdos reciclados

Agregado	Amostra 1	Amostra 2	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
RCDREF	3,26	3,03	3,15	0,16	5,18
RCDJI	2,92	2,79	2,85	0,09	3,20
RCDJS	2,99	2,69	2,84	0,21	7,34

(fonte: elaborado pelo autor)

Conforme a NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), o índice de forma dos grãos para agregados graúdos em concreto não deve ser superior a 3. O RCDREF é caracterizado por uma maior lamelaridade, possuindo uma grande diferença entre os comprimentos e espessuras dos grãos e, portanto, não obedece as especificações da norma de agregados para concreto. Quando avaliada a média das duas amostras, verifica-se uma melhora nos valores de índice de forma após o processo de jigagem. No entanto, deve-se levar em conta a variabilidade do ensaio, de modo que, analisando os dados de cada amostra, nota-se que ocorre uma certa proximidade dos valores em relação a todos os agregados.

De maneira geral, não se encontrou evidências relacionadas a mudanças no índice de forma após o processo de jigagem a seco na bibliografia. Salienta-se que a agitação que ocorreu no jigue pneumático possa influenciar nos desgaste das pontas dos grãos do agregado, uma vez que o material coletado contém uma quantidade considerável de partículas de arenito (item 4.5.3), caracterizado por possuir fácil degradação. No entanto, qualifica-se essa ideia como pouco provável, levando a crer que o resultado obtido se dê pela heterogeneidade dos grãos de RCD.

Verificou-se os altos valores de índice de forma do agregado reciclado coletado quando comparados aos presentes na bibliografia. Angulo (2000) coletou suas amostras em Ribeirão Preto (SP) e obteve um valor médio de índice de forma de 2,01. Leite (2001) obteve um valor médio de 2,3 de seus agregados coletados em Porto Alegre (RS). Os agregados reciclados coletados por Cordeiro (2013), em Porto Alegre (RS), obtiveram índices de forma variáveis, de 1,58 a 2,35.

Acredita-se que os altos valores de índice de forma apresentados podem ter prejudicado a separação dos materiais, uma vez que, segundo Correa (2014) e Zortea F. (2014), a forma dos grãos também influencia neste processo.

### **4.5.3 Composição**

O objetivo do ensaio de composição é classificar os grãos presentes no agregado conforme sua origem, tais como argamassas, concretos, cerâmicas, rochas, materiais mistos, impurezas. Como se trata de um ensaio não normatizado, o procedimento adotado foi uma análise visual

dos agregados reciclados, separados em cinco amostras de aproximadamente 1,5 kg entregues para cinco pessoas diferentes realizarem a classificação (figura 21).

Os materiais classificados consistem em concretos, argamassas, cerâmicas, cerâmicas esmaltadas, rochas (arenitos e basaltos), grãos mistos (argamassa aderida a uma cerâmica, por exemplo) e impurezas (vidros, gessos, torrões de terra, materiais ferrosos, telhas de fibrocimento). Vale destacar que, embora tenha sido feito uma triagem inicial com intuito de retirar essas impurezas do agregado, o material ainda possuía aproximadamente 2% em sua composição inicial, o que pode ser considerado desprezível.

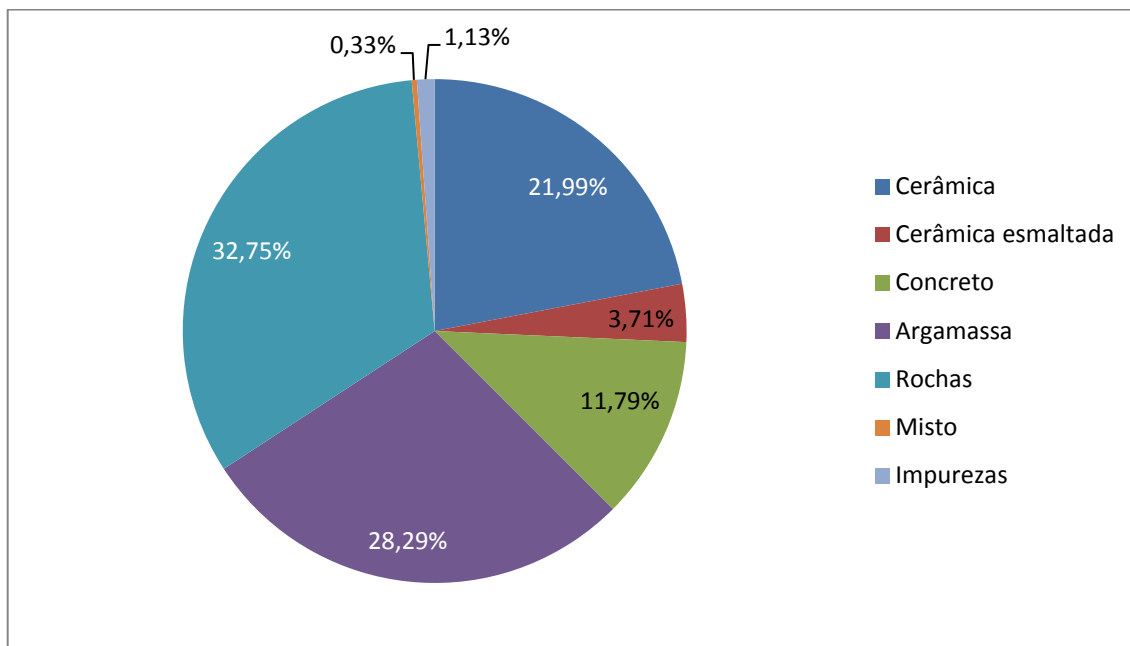
Figura 21 - Separação e classificação dos grãos de RCD



(fonte: elaborado pelo autor)

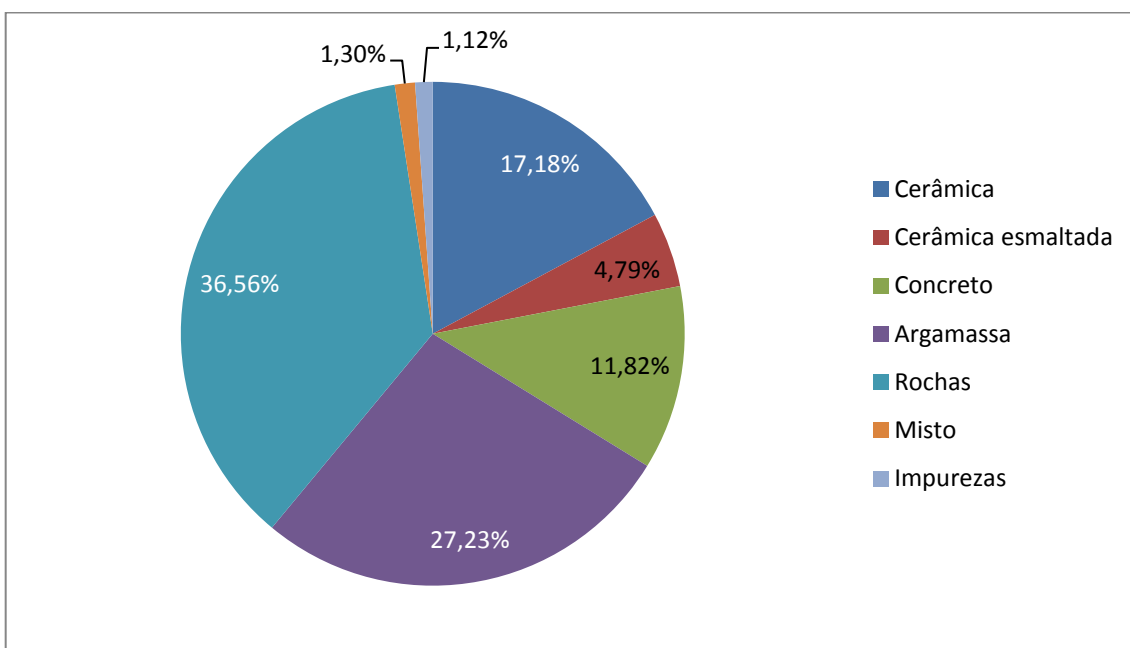
Esse método torna a avaliação dos grãos subjetiva a cada pessoa, sendo feita uma média de todos os resultados ao final do processo, conforme mostram as figuras 22, 23 e 24.

Figura 22 - Média das composições do RCDREF



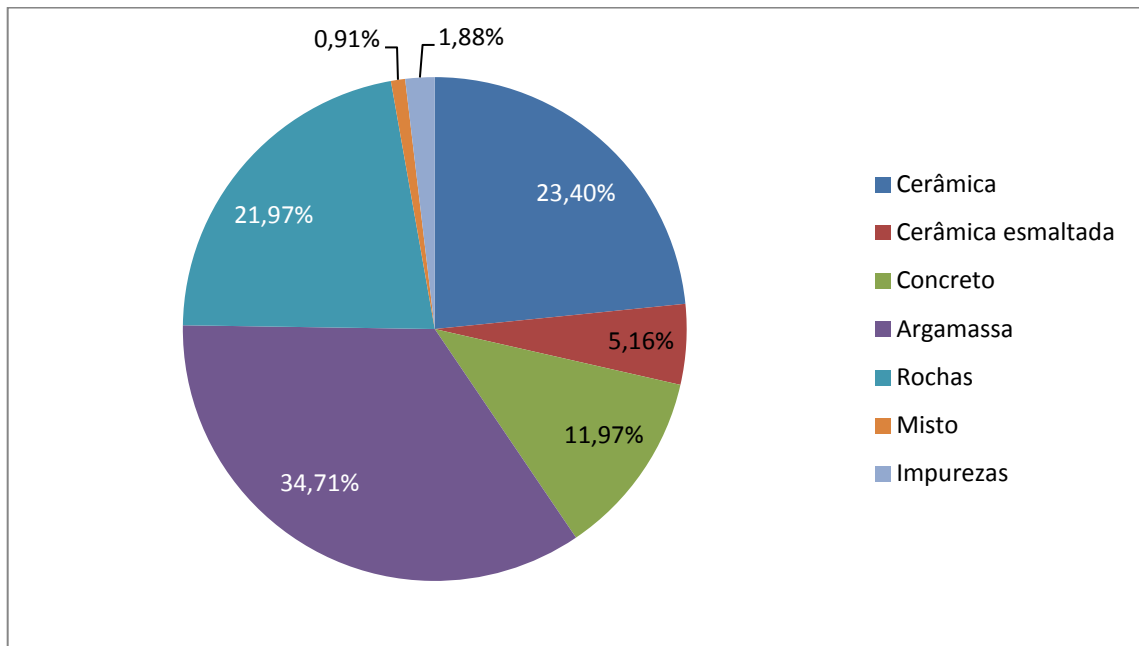
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 23 - Média das composições do RCDJI



(fonte: elaborado pelo autor)

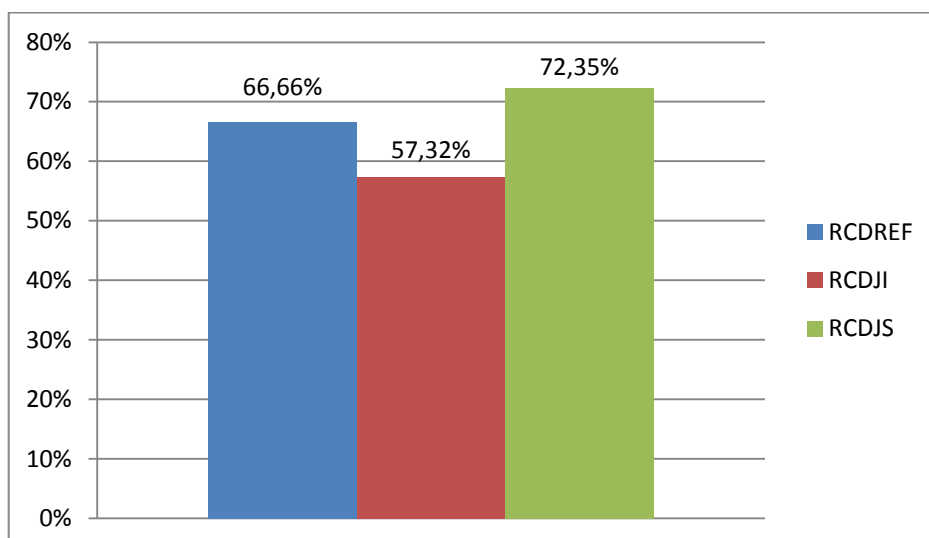
Figura 24 - Média das composições do RCDJS



(fonte: elaborado pelo autor)

Vale destacar que, dentro do percentual de rochas nas composições, percebeu-se uma grande quantidade de arenito nas composições de RCD. É importante ressaltar a presença em massa dessa rocha, uma vez que, segundo Isaia (2007), caracteriza-se por um material mais poroso e menos resistente que basaltos e granitos, agregados mais comuns em confecções de concreto. A presença de arenito nas três amostras do RCD estudado está ilustrado na figura 25.

Figura 25 - Percentual de arenito nas rochas das diferentes amostras de RCD



(fonte: elaborado pelo autor)

O principal objetivo do jigue pneumático a seco é separar os grãos dos agregados em suas respectivas densidades, de modo que os mais densos se acomodem nas bandejas inferiores e os menos densos nas superiores. Dito isso, esperava-se que os materiais mais densos, como agregados de basalto e concreto, presentes no RCDREF estariam em maior quantidade nas composições feitas no RCDJI. Desse modo, percebeu-se uma elevação considerável na quantidade de rochas de origem basáltica no RCDJI, uma vez que, ao analisar as figuras 22, 23 e 25, além de haver uma maior quantidade de rochas, há um menor percentual de arenito, visto que são materiais mais leves e menos densos. Em contrapartida, em relação ao concreto, não há mudanças expressivas nas amostras. O fato pode ser explicado devido à origem do RCD, visto que é proveniente de um local onde as construções não são muito solicitadas, ou seja, os concretos não possuem resistências altas, sendo confeccionados com menores quantidades de cimento e, portanto, possuindo uma menor densidade.

Em relação às impurezas, percebeu-se um leve aumento nas bandejas superiores, uma vez que gesso, torrões de areia e telhas de fibrocimento possuem densidades bem menores que os outros materiais. Por outro lado, o vidro apresenta densidade próxima do concreto, por exemplo, ficando disposto em todas bandejas do jigue.

As argamassas encontravam-se em todas as bandejas do jigue, havendo um maior percentual na bandeja de cima. Por se tratar de um material bastante variável em relação ao seu destino (assentamento de blocos, reboco, chapisco, entre outros) e os materiais utilizados, podendo ser confeccionado com cimento ou cal, esperava-se essa variabilidade de comportamento no processo de jigagem. Pode-se destacar que, através da figura 20a e 20b, os grãos de argamassa presentes na amostra de RCDJI possuem uma coloração mais escura que RCDJS, indicando uma maior quantidade de cimento e, portanto, uma maior densidade desse material.

As cerâmicas provenientes de blocos são caracterizadas por materiais menos densos, portanto, percebeu-se que esse material se encontra em maior quantidade na bandeja superior do jigue. As cerâmicas esmaltadas se encontram em todas as bandejas, não havendo um comportamento de maior evidência.

Embora tenha se verificado algumas diferenças nas composições, acredita-se que o processo de jigagem a seco não tenha promovido modificações expressivas nesse parâmetro como era

esperado. A tabela 7 apresenta um resumo das diferenças de percentuais antes e após o processamento no jigage.

Tabela 7 - Diferença de percentuais de composição após o processo de jigagem a seco

Material	RCDREF (%)	RCDJI (%)	RCDJS (%)
Cerâmica	21,99	17,18% (-4,81%)	23,4 (+1,41%)
Cerâmica esmaltada	3,71	4,79% (+1,08%)	5,16 (+1,45%)
Concreto	11,79	11,82% (+0,03%)	11,97 (+0,18%)
Argamassa	28,29	27,23% (-1,06%)	34,71 (+6,41%)
Rochas	32,75	36,56% (+3,81%)	21,97 (-10,78%)
Misto	0,33	1,3% (+0,97%)	0,91 (+0,58%)
Impurezas	1,13	1,12% (-0,01%)	1,88 (+0,75%)

(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.5.4 Massa específica

Como o agregado reciclado é caracterizado por um material frágil e poroso, foi utilizado um método de determinação de massa específica proposto pela tese de Leite (2001). O ensaio, descrito em forma de norma, recomenda a utilização de um picnômetro ou um balão volumétrico como recipiente de aproximadamente 1000ml e uma balança de precisão 0,1g. A amostra de agregado, previamente seca em estufa durante 24 horas, pesa em torno de 800 e 1000g, sendo esse valor registrado como massa da amostra seca em estufa (C). Posteriormente, coloca-se o agregado no recipiente e, em seguida, uma quantidade de água suficiente para preencher todo o material. Esse conjunto deve permanecer em repouso durante 24 horas. Dado esse tempo, aplica-se vácuo no recipiente durante 15 minutos, de modo a possibilitar a saída de ar aprisionado entre os agregados (figura 26). Em seguida, preenche-se todo o recipiente de água e, com auxílio de uma placa de vidro, evita-se a presença de bolhas no local. Essa amostra de todo o conjunto é pesada, registrando esse valor (A). Por fim, pesa-se todo o conjunto, sem o agregado, preenchido de água. (B). O valor de massa específica  $\gamma$  (kg/dm<sup>3</sup> ou g/cm<sup>3</sup>) do agregado reciclado é descrito pela equação 1:

$$\gamma = \frac{C}{B - A + C} \quad (\text{equação 1})$$



A = massa do recipiente + amostra + água, em g;

B = massa do recipiente + água, em g;

C = massa da amostra seca em estufa, em g.

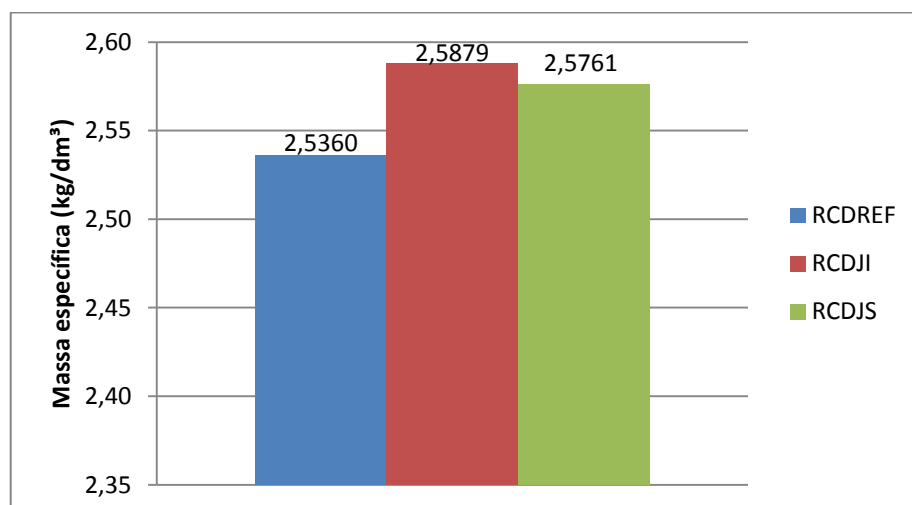
Figura 26 - Aplicação de vácuo na amostra para ensaio de massa específica



(fonte: elaborado pelo autor)

Por fim, comparou-se os valores de massa específica para RCDREF, RCDJI e RCDJS, ilustrados na figura 27.

Figura 27 - Influência do processo de jigagem a seco na massa específica dos agregados reciclados



(fonte: elaborado pelo autor)

Pode-se perceber que os valores não diferem muito entre si antes e após o processo de jigagem a seco. Como descrito anteriormente, o parâmetro de massa específica está diretamente relacionado com a porosidade do material. Como não houve mudanças expressivas nas composições de materiais do agregado, antes e depois da utilização do jigue pneumático, esperava-se que a absorção de água (descrita no item 4.5.6) e, conseqüentemente, a massa específica das amostras também não sofreriam maiores modificações.

Os valores obtidos através do método de Leite (2001) estão de acordo com os da bibliografia (tabela 8), os quais também utilizaram o mesmo procedimento. Os valores mais altos encontrados por Cordeiro (2013) se dão pelo fato de serem provenientes de agregados reciclados de concretos, que possuem maiores valores de massa específica comparados aos de origem mista.

Tabela 8 - Comparativos de massa específica dos agregados reciclados utilizando o método de Leite (2001)

<b>Autor</b>	<b>Composição</b>	<b>Massa específica (kg/dm<sup>3</sup>)</b>
Leite (2001)	Misto	2,51
Vieira (2003)	Misto	2,52
Lovato (2007)	Misto coleta 1	2,53
	Misto coleta 2	2,52
	Misto coleta 3	2,64
Cordeiro (2013)	AGR de concreto 15 MPa	2,73
	AGR de concreto 30 MPa	2,74

(fonte: adaptado pelo autor)

#### 4.5.5 Massa unitária

O ensaio de massa unitária foi feito conforme o método C da NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), o qual determina o enchimento do material, previamente seco em estufa, em um recipiente de massa e volume conhecido, nivelando devidamente a borda com uma haste e garantindo o total preenchimento do agregado (figura 28).

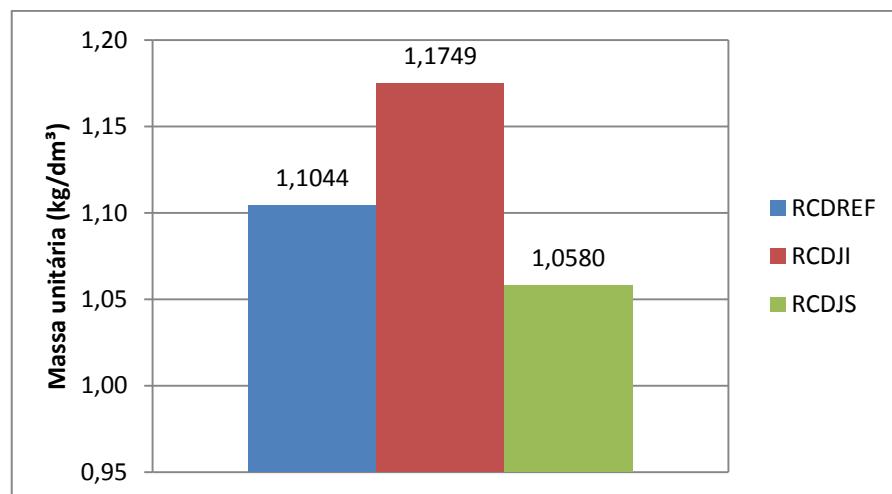
Figura 28 - Preenchimento do RCD para o ensaio de massa unitária



(fonte: elaborado pelo autor)

A partir dos valores obtidos nos ensaios para os agregados antes e após o processo de jigagem a seco, construiu-se o gráfico comparativo dos resultados (figura 29).

Figura 29 - Comparativo de massa unitária dos agregados reciclados



(fonte: elaborado pelo autor)

Conforme o ensaio de composição granulométrica previamente manifestara, o RCDJI possui grãos menores que preenchem o vazio deixado pelos grãos maiores. Consequentemente, o material ocupa uma maior massa dentro de um mesmo volume. Por outro lado, o RCDJS possui grãos mais homogêneos, de modo que, ao compactar o material, o agregado possui mais vazios em um mesmo volume de material, resultando em uma menor massa unitária.

Além disso, embora a diferença seja muito pequena, a massa específica do material RCDJI é maior que as dos demais, corroborando com os dados obtidos.

Esses resultados confirmam o que se encontra na bibliografia em relação a massa unitária de agregados reciclados, conforme pode ser visualizado na tabela 9.

Tabela 9 - Comparativo de valores de massa unitária de agregados reciclados presentes na bibliografia

<b>Autor</b>	<b>Massa unitária (kg/dm<sup>3</sup>)</b>
Lovato (2007)	1,07
Leite (2001)	1,12
Zordan (1997)	1,09

(fonte: adaptado pelo autor)

#### 4.5.6 Absorção de água

Conforme já visto, o agregado reciclado possui grande porosidade e uma facilidade de desagregação. Portanto, considerou-se o método descrito pela NBR NM 53 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009) ineficiente para os agregados reciclados utilizados nessa pesquisa devido a grande quantidade de arenito e outros materiais quebradiços, visto que a secagem superficial proposta pela norma poderia ocasionar a desagregação do agregado e interferir nos resultados. Dito isso, determinou-se a taxa de absorção pelo método desenvolvido por Leite (2001), adaptado para agregados reciclados.

Inicialmente, utiliza-se uma quantidade de material com massa entre 1000 e 1500 gramas, previamente seca em estufa durante 24 h. Com auxílio de um aparato especial (figura 30), submerge-se os agregado na água, realizando a primeira leitura. Para as leituras seguintes, foi feita uma breve agitação dos agregados, de modo a permitir a saída de ar aprisionado entre os grãos.

Figura 30 - Ensaio de absorção de água



(fonte: elaborado pelo autor)

O cálculo da absorção em gramas e o seu percentual foram determinados pelas equações 2 e 3, respectivamente:

$$A(g) = \frac{M_n}{M_0} \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

$A(g)$  = massa de água absorvida até o instante  $n$ , em g

$M_n$  = massa do conjunto submerso no instante  $n$ , em g

$M_0$  = massa do conjunto submerso no instante inicial, em g

$$A_n(g) = \frac{A(g)_n}{A(g)_{24h}} \times 100 \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

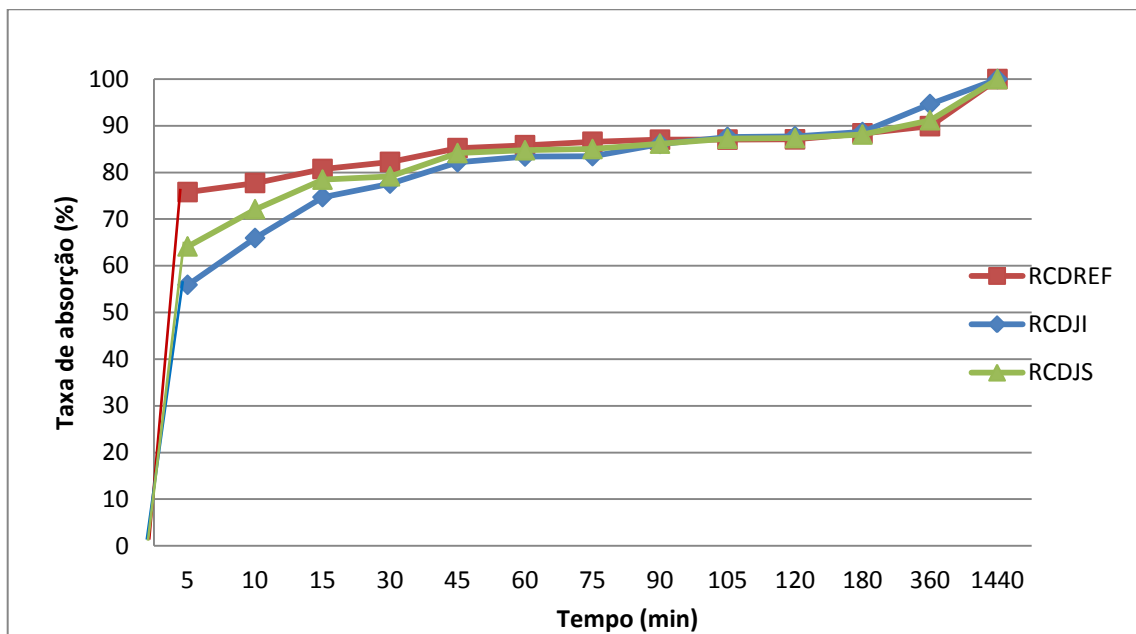
$A_n(\%)$  = Absorção de água percentual no instante  $n$

$A(g)_n$  = Massa de água absorvida até o instante  $n$ , em g

$A(g)_{24h}$  = Massa de água absorvida em 24 horas de ensaio, em g

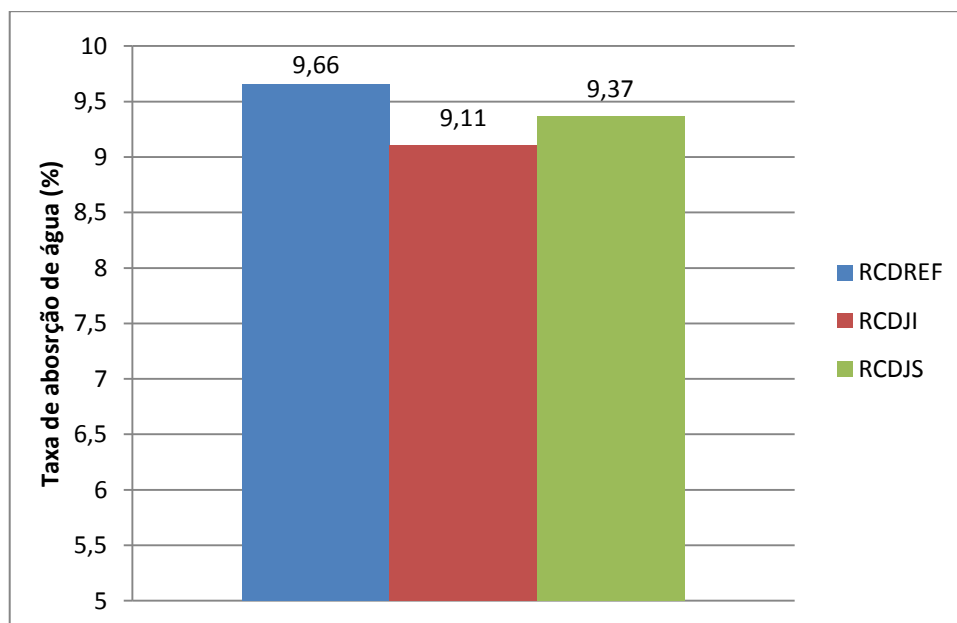
A partir dos valores de taxa de absorção calculados para cada intervalo de tempo, construiu-se o gráfico percentual de absorção de água x tempo (figura 31) e, por fim, comparou-se os valores de taxa de absorção de água final para cada tipo de agregado reciclado, conforme mostra a figura 32.

Figura 31 - Comparativos da taxa de absorção em função do tempo para cada tipo de agregado



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 32 - Influência do processo de jigagem a seco na taxa de absorção de água dos agregados



(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando as 3 curvas esboçadas na figura 31, percebe-se a grande absorção de água dos agregados reciclados nos primeiros minutos do ensaio, uma vez que, em cerca de 30 minutos, atingiu-se o valor de 80% do total de água absorvida em 24 horas. Esse fato já seria constatado na bibliografia por Leite (2001) que obteve 50% de água absorvida em apenas 10 minutos de ensaio. Lovato (2007) obteve, também, um percentual de 80% em um tempo de apenas 30 minutos.

O fato de o RCDJI possuir grãos menores levava a crer em uma maior absorção desse material. No entanto, verificou-se um decréscimo de 5,79% de absorção em relação ao RCDREF, sendo possível indicar uma ligeira diminuição de porosidade das partículas da camada inferior do jigge pneumático.

De maneira geral, o processo de jigagem não proporcionou muita alteração nas características de absorção dos agregados, seja na bandeja superior ou na inferior. Acredita-se que, de maneira semelhante à massa específica, a composição (item 4.5.3) é um fator determinante para maiores alterações desses resultados, uma vez que, não havendo mudanças nos materiais que compõem o agregado, não haverá modificações significativas na absorção dos mesmos.

## 4.6 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

Após toda a caracterização do material, iniciou-se a moldagem dos corpos de prova de concreto, cuja todas as etapas e informações estão descritas nos itens a seguir.

### 4.6.1 Materiais utilizados

#### 4.6.1.1 Cimento

O cimento utilizado para a pesquisa é o cimento Portland CP IV-32. A escolha por esse material é devido a sua grande disponibilidade e utilização na região sul.

#### 4.6.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado trata-se de uma areia quartzosa média, seca em ambiente de laboratório. A distribuição granulométrica, o diâmetro máximo e o módulo de finura, realizados de acordo com a NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), bem como a massa específica e a massa unitária, estão descritos na tabela 10.

Tabela 10 - Características da areia utilizada no trabalho

Peneiras (mm)	% Retida	% Retida acumulada
4,8	1	1
2,4	4	5
1,2	10	15
0,6	20	35
0,3	46	81
0,15	17	98
< 0,15	2	100
Diâmetro máximo		2,40 mm
Módulo de finura		2,35
Massa específica - NBR NM 52 (ABNT, 2009)		2,55 kg/dm <sup>3</sup>
Massa unitária - NBR NM 45 (ABNT, 2006)		1,54 kg/dm <sup>3</sup>

(fonte: elaborado pelo autor)



#### 4.6.1.3 Água

A água utilizada na pesquisa é potável e proveniente da rede pública do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) de Porto Alegre.

#### 4.6.2 Dosagem

Conforme descrito na revisão bibliográfica, a resistência dos concretos produzidos com agregados reciclados está limitada à resistência do agregado. Desta forma, as proporções foram definidas através do modo de ruptura. Assim, escolheu-se uma proporção aglomerante:agregados rica (1:2,5), forçando um rompimento no agregado ou, em alguns casos, na interface da argamassa com o agregado. Essa diretriz foi definida a fim de avaliar unicamente o comportamento do agregado na matriz de concreto. Em contrapartida, a proporção mais pobre (1:5,5) possibilita a ruptura no agregado, na interface ou na argamassa. Por fim, a proporção intermediária a fim de definir uma curva de dosagem.

Escolheu-se o método de dosagem proposto por Helene e Terzian (1992), que consiste no ajuste de um teor de argamassa ideal, com um abatimento fixo, a partir de um traço intermediário, seguido de um pobre e outro rico. Com o abatimento fixado em  $100 \pm 20$  mm, foram feitos alguns testes de dosagem com 51%, 53% e 55% como teores de argamassa. Dessa forma, através de análises visuais associadas ao abatimento definido, concluiu-se que o valor de 55% foi o teor ideal de argamassa. A partir de todos os traços definidos, suas respectivas relações a/c, resistência à compressão dos corpos de prova a 28 dias e consumo de cimento em  $m^3$ , gera-se o diagrama de dosagem. A tabela 11 resume os traços, relações a/c e abatimentos obtidos em todas as proporções dos três tipos de agregados reciclados.

Tabela 11 - Resumo das informações dos traços utilizados no trabalho

<b>Agregado</b>	<b>Proporção</b>	<b>Teor de argamassa (%)</b>	<b>Traço</b>	<b>a/c</b>	<b>Abatimento (mm)</b>
RCDREF	1:2,5	55	1:0,92:1,57	0,38	90
	1:4,0	55	1:1,75:2,25	0,47	90
	1:5,5	55	1:2,57:2,92	0,58	90
RCDJI	1:2,5	55	1:0,92:1,57	0,37	90
	1:4,0	55	1:1,75:2,25	0,45	90
	1:5,5	55	1:2,57:2,92	0,58	90
RCDJS	1:2,5	55	1:0,92:1,57	0,38	95
	1:4,0	55	1:1,75:2,25	0,48	95
	1:5,5	55	1:2,57:2,92	0,58	90

(fonte: elaborado pelo autor)

### 4.6.3 Moldagem dos corpos de prova

O primeiro passo para confecção dos corpos de prova de concreto a serem ensaiados no trabalho foi a definição da quantidade de material a ser utilizado para atender o número de formas.

Outro aspecto a ser considerado na produção do concreto é a porosidade do agregado de RCD. Conforme visto no item 3.3.2, os agregados reciclados possuem uma elevada taxa de absorção em relação aos agregados naturais. Leite (2001), Vieira (2003), Lovato (2007), Cordeiro (2013), entre outros ressaltam a necessidade de uma pré molhagem do agregado, de modo a evitar que o agregado absorva a água da mistura e prejudique a trabalhabilidade do concreto. Por outro lado, os autores salientam que utilizar a amostra saturada pode acarretar problemas a porosidade do concreto, devido à saída da água em excesso. Além disso, a boa rugosidade do agregado reciclado deve ser considerada, visto os seus benefícios a zona de transição entre a argamassa e o agregado. Considerando o trabalho de Cordeiro (2013), o qual afirma 80% ser o teor ótimo de saturação do agregado, e analisando a absorção do agregado reciclado no item 4.5.6, foi feita uma pré molhagem de 2 horas do agregado e, após a retirada da água, colocou-se o material em peneiras secando à temperatura ambiente de laboratório por 2 horas, iniciando a moldagem em seguida (figura 33). Dessa forma, saturou-se o agregado no seu interior e manteve-se a superfície seca, possibilitando uma melhor aderência com a argamassa.

Figura 33 - Aspecto visual dos agregados mantidos nas peneiras para secar a superfície dos grãos



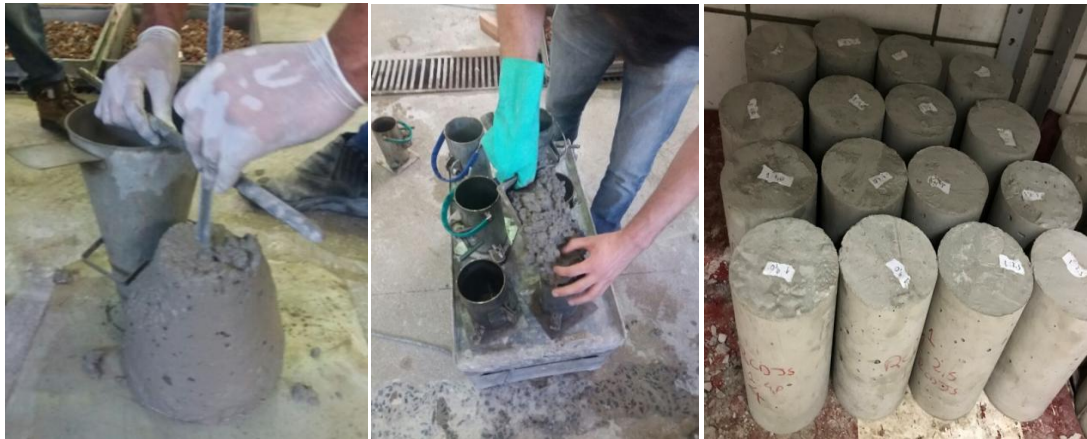
(fonte: elaborado pelo autor)

Devido à fragilidade do material, o processo de produção dos concretos com agregados reciclados é diferente em relação aos agregados naturais. Usualmente, a ordem de colocação dos materiais na betoneira inicia com o agregado graúdo, no entanto, no caso dos agregados reciclados, essa ordem pode causar a desagregação do material devido aos atritos causados pela betoneira, podendo causar mudanças na sua granulometria. Portanto, adotou-se a ordem de colocação dos componentes sugerida por Cordeiro (2013): cimento, água, areia, agregado reciclado e água. Sendo assim, forma-se uma camada de argamassa, protegendo o agregado reciclado dos impactos da betoneira e evitando mudanças nas suas características.

Dando sequência ao processo de produção do concreto, mediu-se o abatimento (figura 34a), segundo a NBR NM 67 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998), e, quando atingido o valor especificado (item 4.6.2), iniciou-se a moldagem dos corpos de prova (figura 34b). Moldou-se as formas em duas etapas: a primeira preenchendo a forma até a metade e a segunda completando de material, ambas vibradas por 10 segundos através de uma mesa vibratória. Por fim, após 24 horas, desmoldou-se os corpos de prova, que foram

levados até uma câmara úmida (figura 34c), com umidade relativa e temperatura controladas de  $95\% \pm 2\%$  e  $23^{\circ}\text{C}$ , mantendo-os durante as idades determinadas pelos ensaios.

Figura 34 - Etapas de produção do concreto (a) Execução do ensaio de abatimento (b) Moldagem dos corpos de prova (c) Corpos de prova mantidos na câmara úmida



(a)

(b)

(c)

(fonte: elaborado pelo autor)

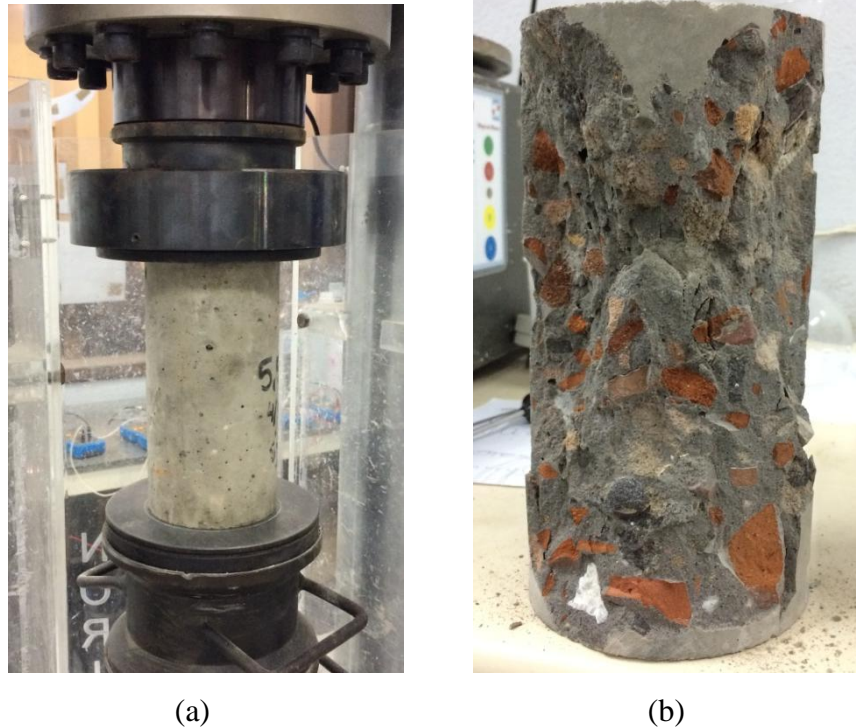
## 4.7 ENSAIOS DOS CORPOS DE PROVA

A metodologia dos ensaios, bem como as normas utilizadas, estão descritas nos itens a seguir.

### 4.7.1 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência a compressão axial dos corpos de prova foi realizado conforme a NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), com idade de ruptura de 28 dias. Para cada traço dos três tipos de agregados reciclados diferentes, foram rompidos no mínimo 7 corpos de prova, considerando também os valores obtidos pelo ensaio de módulo de elasticidade. Anteriormente, retificou-se a superfície dos corpos de prova em laboratório, a fim de garantir uma aplicação uniforme de carga sobre toda a sua face. A seguir, mediu-se o diâmetro e a altura do corpo de prova para, se necessário, corrigir os valores obtidos posteriormente. O equipamento utilizado é descrito como uma prensa servo hidráulica EMIC com capacidade de 200 toneladas e velocidade de aplicação de carga de  $0,45 \text{ MPa/s}$ . Após o rompimento, analisou-se, além dos valores, a forma e o local de ruptura do corpo de prova a fim de esclarecer melhor os resultados. O corpo de prova durante o ensaio e após a ruptura pode ser visto na figura 35.

Figura 35 - Ensaio de resistência à compressão axial (a) Corpo de prova submetido à tensão (b) Análise da forma e local de ruptura



(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.7.2 Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão foi realizado de acordo com a metodologia A da NBR 8522 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017), a qual aplica-se uma carga a 0,5 MPa/s, mantendo durante 60 segundos e repetindo esse ciclo 3 vezes. Para medir a deformação, utilizou-se um extensômetro elétrico (figura 36). Previamente, calcula-se uma média das cargas de ruptura obtidas pelo ensaio de resistência à compressão axial, uma vez que a carga aplicada no ensaio corresponde a 30% da tensão de ruptura. Foram ensaiados, então, 3 corpos de prova por traço, obtendo valores de módulo de elasticidade e de resistência à compressão axial.

Figura 36 - Ensaio de módulo de elasticidade à compressão



(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.7.3 Penetração de íons cloreto

O ensaio de penetração de íons cloreto foi realizado de acordo com o método descrito pela ASTM C 1202 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012), o *Test Method for Electrical Indication of Concrete's ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Basicamente, o ensaio consiste em utilizar corpos de prova cilíndricos de  $510 \pm 30$  mm de altura entre duas cédulas de acrílico, uma contendo solução de cloreto de sódio (NaCl), com concentração de 3% em massa, e a outra com solução de hidróxido de sódio (NaOH), com concentração de 0,3N.

Primeiramente, marcou-se os corpos de prova (9,5 cm x 19 cm) para serem fatiados, escolhendo-se as fatias centrais do mesmo. Para cada traço, então, obteve-se 4 fatias para serem posteriormente ensaiadas (figura 37a). Em seguida, impermeabilizou-se as laterais dos corpos de prova com resina epóxi, mantendo livres apenas as faces que estarão em contato com a solução. Após secagem do produto, aplicou-se vácuo nas amostras por meio de um dessecador durante 3 horas. Logo depois, preencheu-se as amostras com água deionizada e deaerada, aplicando mais 1 hora de vácuo no dessecador (figura 37b). Por fim, manteve-se as amostras submersas durante  $18 \pm 2$  horas até a realização do ensaio.



Figura 37 - Procedimentos do ensaio de penetração de íons cloreto (a) Corpos de prova com resina epóxi (b) Aplicação de vácuo nas amostras



(a)



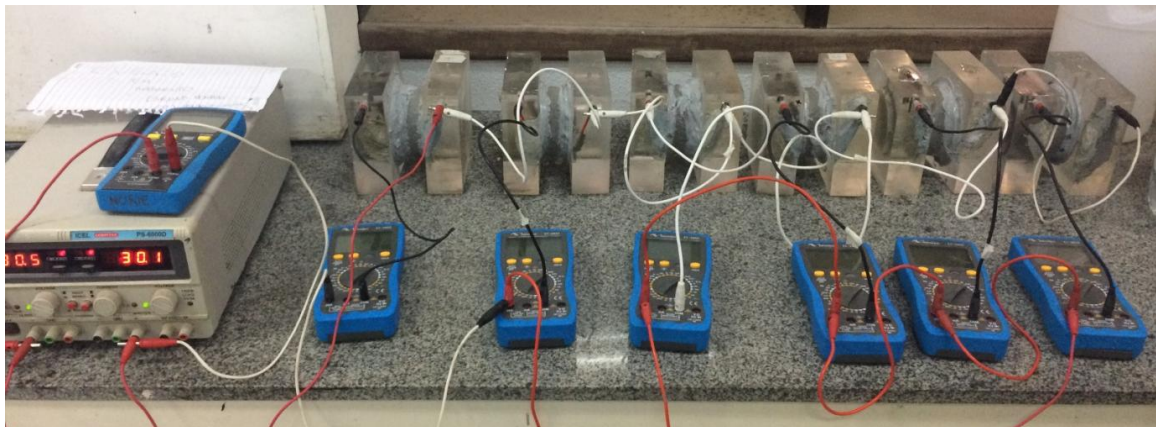
(b)

(fonte: elaborado pelo autor)

Como se trata de um ensaio comparativo, o método descrito pela ASTM C 1202 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012) não determina a idade de cura dos corpos de prova. Dessa forma, por maior praticidade, escolheu-se a idade de 28 e 29 dias para realização dos ensaios.

O ensaio consiste na aplicação de uma carga de  $60 \pm 0,1$  V, medindo-se a corrente entre intervalos de 30 minutos durante 6 horas. Esses valores representam a resistência do concreto em relação a penetração de íons cloretos, de modo que quanto maior o valor da corrente, maior a passagem desses íons. A figura 38 ilustra a realização do ensaio.

Figura 38 - Montagem do ensaio de penetração de íons cloreto



(fonte: elaborado pelo autor)

Como resultado, calcula-se a carga total passante pelos corpos de prova de acordo com a equação 4. Além disso, o método descrito pela ASTM C 1202 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012) determina uma classificação do concreto de acordo com os valores encontrados, conforme mostra a tabela 12.

$$Q = 900(I_0 + 2 \cdot I_{30} + 2 \cdot I_{60} + 2 \cdot I_{90} + \dots + 2 \cdot I_{330} + I_{360}) \quad (\text{equação 4})$$

Tabela 12 - Classificação dos concretos em relação à penetração de íons cloreto mediante à carga passante

<b>Carga passante (Coulombs)</b>	<b>Penetração de íons cloreto</b>
> 4000	Alta
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baixa
100 - 1000	Muito baixa
< 100	Desprezível

(fonte: ASTM C 1202, 2012)



## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados todos os resultados dos ensaios realizados nos corpos de prova moldados. A partir dos dados obtidos, foi feita uma análise estatística por meio do software Statistica 8, utilizando a Análise de Variância (ANOVA) para avaliar a significância ou não dos resultados. Por fim, foi discutida a influência do processo de jigagem a seco na variabilidade dos resultados obtidos.

### 5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Conforme dito no capítulo anterior, todos os corpos de prova foram ensaiados de acordo com a NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007) com a idade de 28 dias.

#### 5.1.1 Análise dos dados

A tabela 13 apresenta as médias dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial, bem como os desvios e os coeficientes de variação para todos os agregados e respectivos traços. Em média, foram ensaiados entre 6 e 7 corpos de prova por traço para cada agregado, incluindo também os que foram utilizados para o ensaio de módulo de elasticidade. Todos os dados são encontrados nos anexos A, B e C deste documento.

Tabela 13 - Dados referentes à resistência à compressão aos 28 dias, bem como os desvios e o coeficiente de variação dos traços e agregados

TRAÇO	AGREGADO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO		
		MÉDIA (MPa)	DESVIO (MPa)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
1:5,5	RCDREF	14,83	0,88	5,93
	RCDJI	15,58	0,95	6,10
	RCDJS	13,79	1,01	7,32
1:4,0	RCDREF	19,74	0,81	4,10
	RCDJI	20,17	1,07	5,30
	RCDJS	16,92	1,75	10,34
1:2,5	RCDREF	22,78	0,80	3,51
	RCDJI	22,85	1,70	7,44
	RCDJS	18,62	2,01	10,79

(fonte: elaborado pelo autor)

Para avaliar a significância ou não dos resultados, foi feita análise estatística de variância (ANOVA) dos resultados (tabela 14). Adotou-se uma probabilidade de 5% como limite de significância, de modo que valores maiores que esse representam a não significância.

Tabela 14 - Análise de significância dos resultados de resistência à compressão

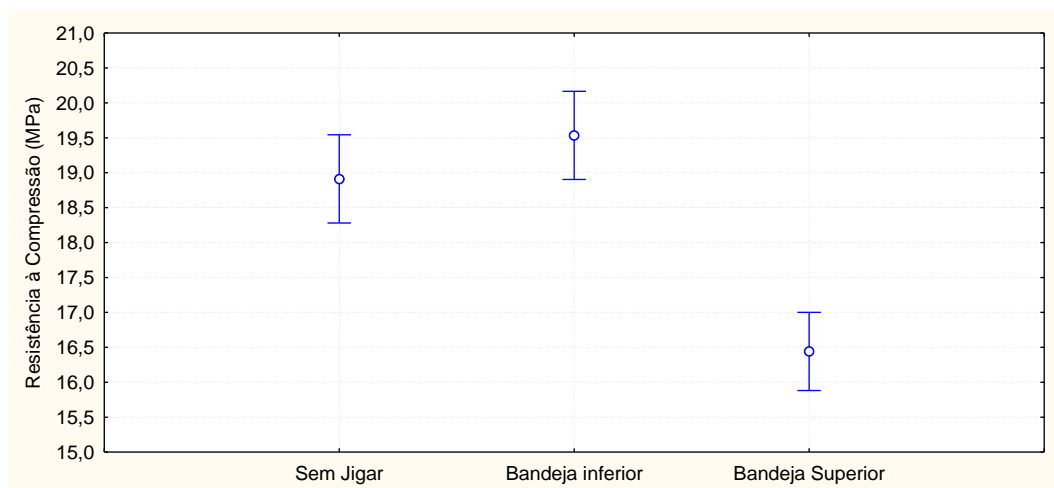
Fonte de variação	Soma quadrada	Graus de liberdade	Média quadrada	F	Significância	Influência significativa
Traço	431,69	2	215,84	121,36	0,00%	S
Processo de separação	111,87	2	55,94	31,45	0,00%	S
Traço*processo de separação	18,01	4	4,50	2,53	5,18%	NS
S - Significativo; NS - Não significativo.						

(fonte: elaborado pelo autor)

A primeira análise que pode ser feita dos resultados apresentados é o comportamento esperado dos traços, de modo que o pobre, o médio e o rico têm valores crescentes de resistência à compressão. Fato confirmado nos dados da tabela, expressando a influência significativa do traço nos resultados.

Em relação ao processo de separação por jigagem a seco, percebe-se que os valores de resistência à compressão obtidos por RCDJS são menores do que os demais. Os valores referentes ao RCDJI são ligeiramente maiores em relação ao RCDREF. Essas análises permitem afirmar a interferência do processo de jigagem a seco na resistência à compressão (figura 39).

Figura 39 - Influência do processo de separação a seco na resistência à compressão aos 28 dias

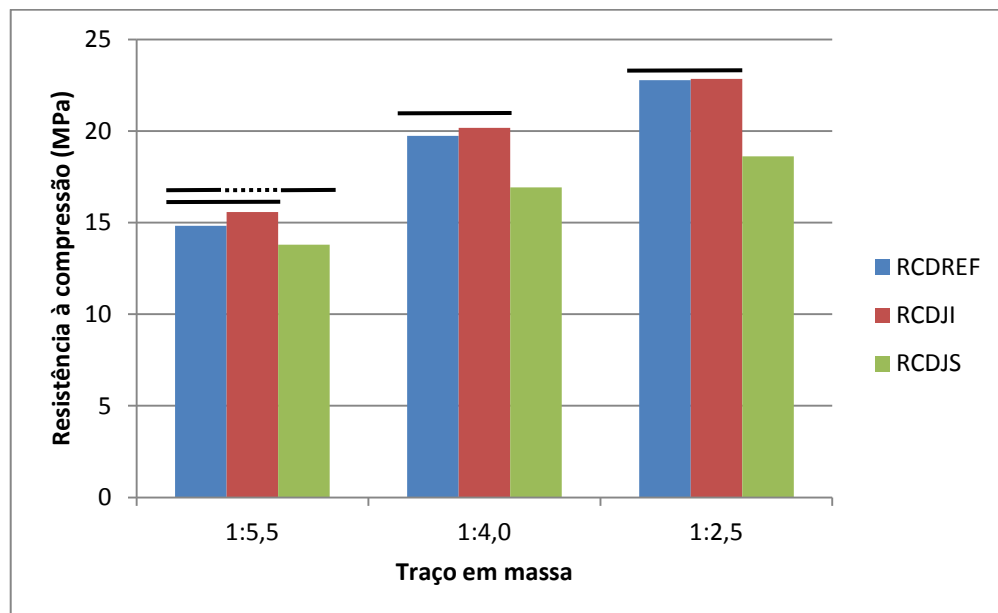


(fonte: elaborado pelo autor)

Embora o traço e o processo de separação, analisados separadamente, exerçam influência significativa à variável de resposta resistência à compressão, quando avaliada a influência conjunta desses dois fatores, não se confirma a significância.

Para corroborar com os resultados, foi feito o teste F (distribuição de Fischer) a fim de comparar os valores de cada traço entre si, verificando a semelhança dos resultados e definindo se podem ser considerados como iguais ou diferentes. Essa análise está representada na figura 40.

Figura 40 - Ilustração do resultado da teste F (distribuição de Fischer) nos valores de resistência à compressão axial



(fonte: elaborado pelo autor)

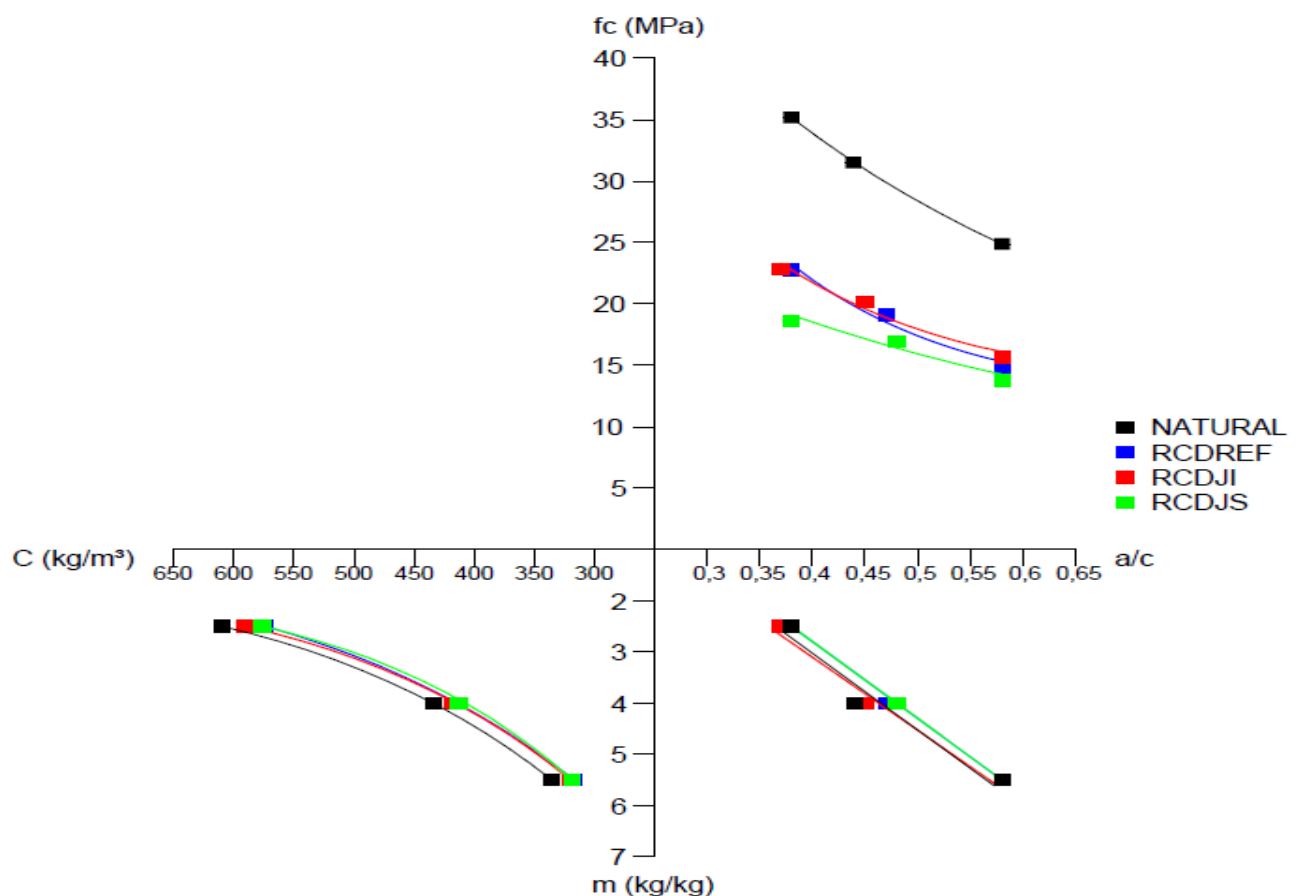
As linhas contínuas do gráfico representam os resultados de forma igualitária, enquanto a linha tracejada, a ausência dessa característica. Em todos os traços, como já visualizado também na tabela 13, nota-se a igualdade de comportamento entre RCDREF e RCDJI. Em relação ao traço 1:5,5, especificamente, RCDREF e RCDJS se comportam de forma igualitária. No entanto, percebe-se a diferença em todas as proporções utilizadas entre RCDJI e RCDJS, havendo um decréscimo de até 19% no traço 1:2,5 nos concretos produzidos com os agregados da bandeja superior do jigüe.

De maneira geral, os concretos produzidos com os agregados reciclados coletados, independente do processo de separação e dos valores de a/c, apresentaram valores de

resistência à compressão abaixo dos aceitáveis para estruturas comuns de concreto armado. No entanto, os valores obtidos, comparados a concretos confeccionados com agregados de RCD, estão de acordo com a bibliografia. Lovato (2007), ao utilizar 100% de agregado gráúdo reciclado em suas misturas de concreto, atingiu uma resistência de aproximadamente 19 MPa, representando um decréscimo de aproximadamente 24% das resistências obtidas com concretos produzidos com agregados naturais. Cabral (2007) teve uma queda de 28% de resistência utilizando agregados reciclados de concreto, obtendo valores menores ainda para os produzidos com cerâmica vermelha e argamassa. Vieira (2003), utilizando a/c igual a 0,4, obteve valores mais altos de resistência, em torno de 40 MPa. Leite (2001) atingiu valores de 35 MPa em média para a/c 0,4, obtendo diminuição desses valores com o aumento dessa relação.

As curvas de dosagem da figura 41 ilustram as baixas resistências e os altos consumos de cimento dos concretos reciclados produzidos comparados aos concretos de agregado natural de Malysz (2018).

Figura 41 - Influência do processo de jigagem nas curvas de dosagem



(fonte: elaborado pelo autor)

Conforme já descrito anteriormente, o fato dos concretos produzidos com agregados reciclados não obterem maiores valores de resistência se deve, principalmente, à porosidade do agregado. Conforme Leite (2001), mesmo utilizando valores baixos de a/c, o agregado reciclado limita a resistência por ser o ponto mais fraco do concreto. A autora salienta, também, que a forma lamelar do agregado também prejudica a resistência do concreto. Além disso, segundo Lovato (2007), a característica do agregado reciclado depende da fonte que o originou e do tipo de obra em construção que fora coletado. De acordo com as descrições da região no item 4.1 e as composições realizadas no item 4.5.3, os agregados reciclados coletados eram provenientes basicamente de residências unifamiliar, não possuindo maiores solicitações de cargas nas estruturas e, conseqüentemente, menos quantidade de concreto e mais materiais como cerâmicas e argamassas. Além disso, a grande quantidade de arenito, caracterizado como um agregado poroso, também foi determinante para esses baixos valores de resistência.

Em relação ao processo de jigagem a seco, conforme mostra a figura 39, obteve-se influência significativa nos resultados de resistência à compressão dos concretos, de modo que o RCDJI obteve valores ligeiramente maiores do que RCDREF, enquanto RCDJS apresentou resistências em torno de 15% mais baixas que os demais. Acredita-se que, como as composições não sofreram modificações expressivas, este fator não impactou de fato nos resultados, como era esperado.

No entanto, a distribuição granulométrica dos grãos antes e após o processo de jigagem a seco sofreu modificações consideráveis. Conforme mostra o item 4.5.1, o RCDJI apresentou uma curva granulométrica mais contínua que os demais, com grãos menores preenchendo os maiores. Todavia, os grãos do RCDJS se concentraram basicamente na peneira #19mm, caracterizando uma granulometria descontínua. Esse fato, segundo Neville (2013), contribui diretamente nos concretos, de modo que, com falta ou excesso de alguma malha, haverá maiores vazios na matriz, influenciando nas suas propriedades mecânicas.

Além do fator empacotamento, diferença de granulometria entre os grãos de RCDJI e RCDJS impactou na resistência à compressão através da penetração da pasta de cimento nas partículas menores dos agregados de RCDJI, devido à porosidade. Desse modo, os grãos pequenos do agregado gráúdo são impregnados pela pasta de cimento do concreto, aumentando a resistência do agregado reciclados. Quando avaliados os grãos de RCDJS, ocorre essa

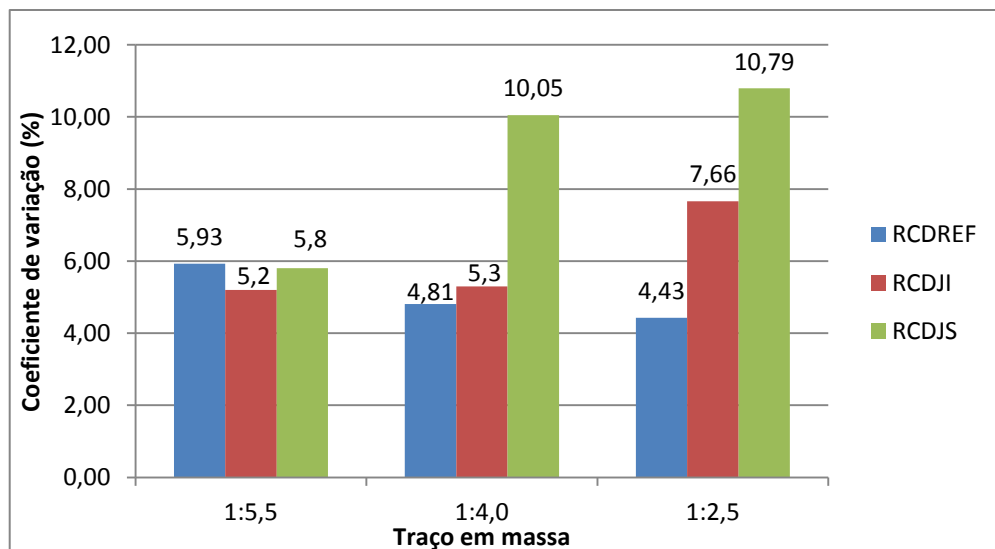
interação entre a pasta e o agregado fortalecendo essa zona de transição, mas, por ter grãos maiores, o interior do agregado segue poroso, não havendo um ganho de resistência. Esse fato corrobora com Leite (2001), que cita a precipitação dos cristais de hidratação nos poros dos agregados reciclados, salientando esse ganho de resistência.

De maneira geral, o processo de jigagem não modificou expressivamente os valores de resistência à compressão para o RCDJI como se esperava. Acredita-se que não houve de fato uma separação dos agregados por densidade, e o processo foi influenciado por outros fatores, como a granulometria e a forma do grão. Essa constatação corrobora com o trabalho de Correa (2014), que, ao produzir concretos com agregados reciclados submetidos ao jigue pneumático, obteve resistências muito próximas dos concretos de referência desse mesmo agregado. Por outro lado, destaca-se a redução considerável da resistência dos concretos produzidos com RCDJS, confirmando a influência do processo de jigagem a seco quando utilizados os grãos presentes na bandeja superior do aparelho.

### 5.1.2 Análise da influência do processo de jigagem a seco na variabilidade

Os dados de média, desvio padrão e coeficientes de variação foram apresentados na tabela 13. A figura 42 representa a influência do processo de jigagem nos coeficientes de variação dos resultados de resistência à compressão para cada traço.

Figura 42 - Influência do processo de jigagem no coeficiente de variação dos resultados de resistência à compressão



(fonte: elaborado pelo autor)

Os dados da figura 42 mostram que o processo de jigagem a seco não obteve a eficiência esperada para reduzir a variabilidade. Com exceção do traço 1:5,5, o qual obteve uma pequena melhora ao jigar, todos os coeficientes de variação aumentaram após o processamento do material no aparelho. Destaca-se os altos valores referentes ao RCDJS nos traços 1:4,0 e 1:2,5, possivelmente devido à variação do modo de ruptura.

Acredita-se que, como não houve de fato uma separação densitária dos agregados ao realizar a jigagem a seco, não se caracterizou a homogeneidade das amostras e, conseqüentemente, dos resultados. Esse fato corrobora com o trabalho de Correa (2014), que obteve uma maior variabilidade de resultados de resistência à compressão de concretos com agregados graúdos reciclados submetidos ao jigue pneumáticos quando comparados aos que não sofreram o processo. O autor também destacou a baixa eficiência do processo para esse tipo de material. Zortea F. (2014) produziu concretos com agregados cerâmicos reciclados de diferentes origens, como estrutural, maciço e 6 furos, submetidos ao processo de jigagem a seco e obteve valores ligeiramente maiores de coeficiente de variação dos resultados de resistência à compressão após a passagem pelo jigue. O autor salientou a falta de sensibilidade do aparelho para a proximidade de densidades dos materiais submetidos ao processo.

## **5.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE**

Os itens a seguir descreverão as discussões sobre os dados de módulo de elasticidade e a influência do processo de jigagem a seco na variabilidade dos mesmos. Foi feita uma análise de variância (ANOVA) a fim de justificar ainda mais os resultados obtidos.

Por motivos de problemas ocorridos na prensa, os resultados de módulo de elasticidade referentes ao concreto produzido com RCDREF ficaram espúrios e, portanto, foram descartados da análise. Desse modo, foram apresentados apenas os dados referentes ao RCDJI e RCDJS.

### **5.2.1 Análise dos dados**

De acordo com a NBR 8522 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017), após a realização do ensaio de módulo de elasticidade, analisa-se os valores e se desconsidera os que possuem uma dispersão maior que 5% em relação a média. Salienta-se

que, conforme descrito anteriormente, os corpos de prova foram submetidos a uma regularização da superfície previamente ao ensaio para aplicar a carga sobre a face de forma igualitária. No entanto, a relação altura/diâmetro dos corpos de prova ficaram todas abaixo de 1,98, valor estabelecido pela norma brasileira. Esse fato pode ser observado na tabela dos dados de resistência à compressão nos anexos A, B e C.

A tabela 15 representa a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação para cada agregado e traço. Todos os dados estão presentes no anexo D deste documento.

Tabela 15 - Dados referentes ao módulo de elasticidade estático

AGREGADO	TRAÇO	MÓDULO DE ELASTICIDADE		
		MÉDIA (GPa)	DESVIO (GPa)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
RCDJI	1:5,5	17,30	0,71	4,10
	1:4,0	19,84	0,58	2,92
	1:2,5	20,38	1,10	5,40
RCDJS	1:5,5	13,00	0,42	3,23
	1:4,0	16,55	0,21	1,27
	1:2,5	16,45	0,35	2,13

(fonte: elaborado pelo autor)

A fim de verificar a significância dos resultados, foi feita uma análise estatística, a ANOVA, utilizando 5% como limite de significância (tabela 16).

Tabela 16 - Análise de significância dos dados obtidos de módulo de elasticidade

Fonte de variação	Soma quadrada	Graus de liberdade	Média quadrada	F	Significância	Influência significativa
Traço	27,298	2	13,649	35,223	0,02%	S
Processo de separação	46,825	1	46,825	120,839	0,00%	S
Traço*processo de separação	0,574	2	0,287	0,740	51,10%	NS
S - Significativo; NS - Não significativo.						

(fonte: elaborado pelo autor)

Ao analisar os dados, verifica-se uma diferença evidente de comportamento entre os concretos produzidos com RCDJI e RCDJS. Sabe-se que o módulo de elasticidade está diretamente relacionado com o agregado graúdo do concreto. Portanto, esse fato leva a crer que houve uma diferença entre os agregados provenientes das camadas superior e inferior de

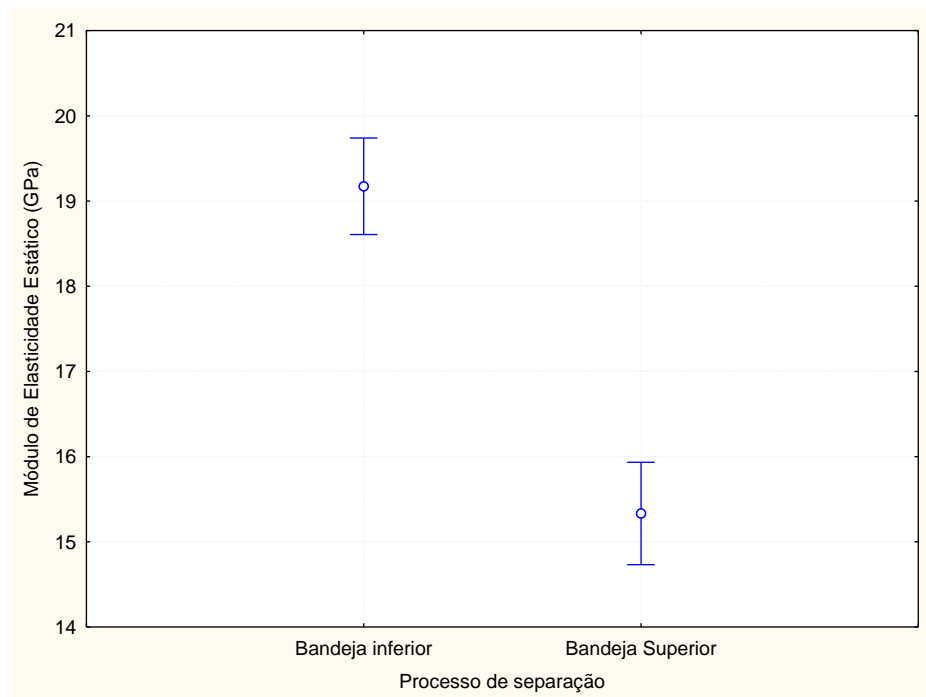


estratificação, embora não tenha se verificado diferenças expressivas nas composições, conforme visto no item 4.5.3. Ademais, o comportamento do módulo de elasticidade condiz com os dados de resistência à compressão (item 5.1), em que os concretos produzidos com RCDJI obtiveram resultados mais satisfatórios em relação ao RCDJS.

Além disso, nota-se uma proximidade maior dos valores de módulo de elasticidade entre os traços 1:4,0 e 1:2,5 em relação a 1:5,5 e 1:4,0, tanto no RCDJI e RCDJS. Esse fato confirma ainda mais a influência do agregado graúdo nos concretos produzidos, de modo que, ao melhorar a matriz, a resistência e o módulo de elasticidade é limitada pelo material reciclado.

De maneira geral, foi possível observar na tabela 16 e na figura 43 a influência significativa do traço e do processo de separação sobre o módulo de elasticidade. No entanto, quando analisada a influência conjunta dos dois fatores, não se verificou a significância.

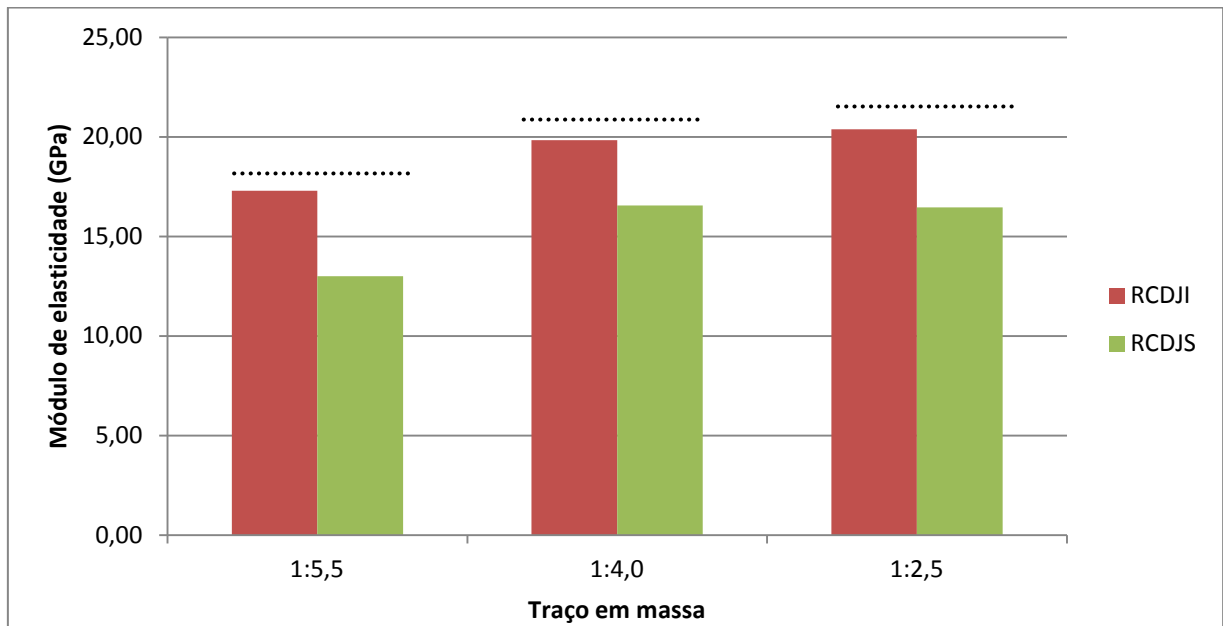
Figura 43 - Influência do processo de jigagem a seco na significância dos resultados de módulo de elasticidade



(fonte: elaborado pelo autor)

Para complementar os dados obtidos, foi feita uma distribuição de Fischer para verificar a semelhança dos resultados (figura 44).

Figura 44 - Distribuição de Fischer para os resultados de módulo de elasticidade



(fonte: elaborado pelo autor)

De maneira geral, obteve-se valores 33%, 20% e 24% maiores nos concretos produzidos com RCDJI em relação ao RCDJS nos traços 1:5,5, 1:4,0 e 1:2,5, respectivamente. A distribuição de Fischer, ilustrada na figura 44, evidenciou ainda mais a diferença de comportamento dos agregados reciclados provenientes das duas camadas de estratificação do jigge pneumático.

Como já era esperado e visto na revisão bibliográfica, os baixos valores potenciais dos concretos reciclados está diretamente ligado com a porosidade do agregado. Os valores corroboram com os de Leite (2001), a qual salientou que, quanto maior a quantidade de agregados porosos na mistura, menores os valores de módulo de elasticidade para os concretos reciclados. Cabral (2007) também verificou uma redução ao substituir o agregado gráudo natural pelo reciclado, destacando a diferença de deformação entre os dois materiais. O autor ainda afirma que a forma lamelar do agregado reciclado pode influenciar nos vazios da matriz no concreto, comprometendo a resistência e o módulo de elasticidade.

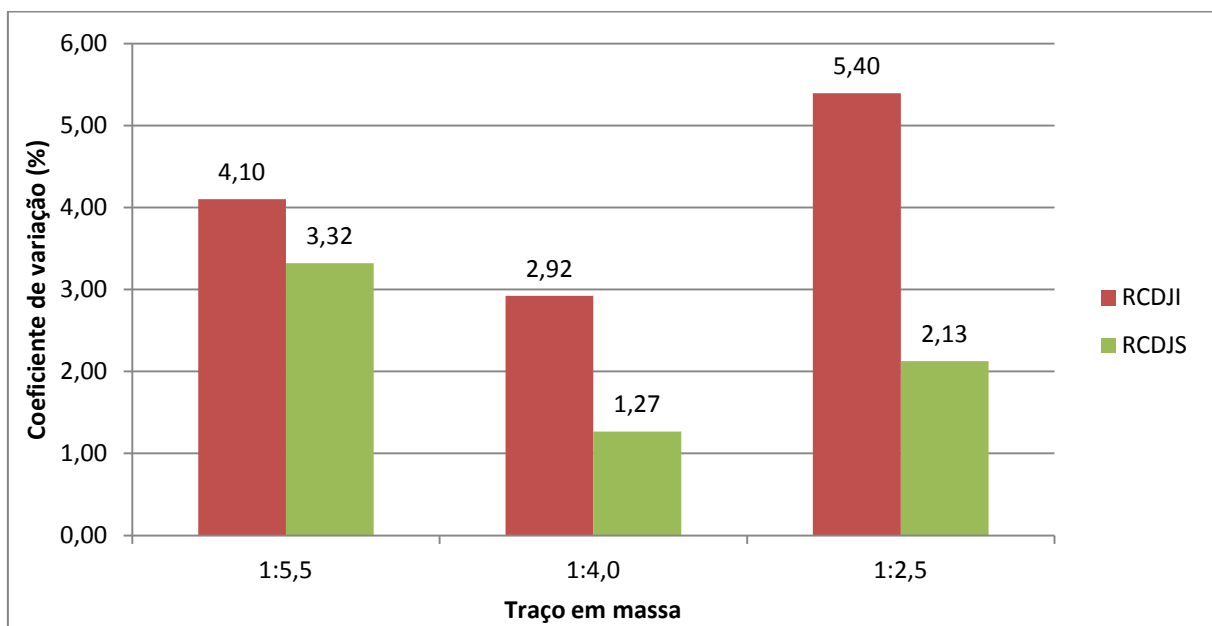
Embora não tenha sido possível avaliar os dados dos concretos produzidos com RCDREF, acredita-se que o comportamento esperado seria semelhante ao demonstrado no ensaio de resistência à compressão, intermediário entre RCDJI e RCDJS, demonstrando uma melhora após o processamento no jigge pneumático em relação aos grãos da bandeja inferior. Esse fato corroboraria com Correa (2014), o qual verificou uma melhora de até 30,43% nos valores de

módulo de elasticidade nos concretos produzidos com agregados após o processo de jigagem a seco.

### 5.2.2 Análise da influência do processo de jigagem a seco na variabilidade

Conforme já visto na tabela 15, os coeficientes de variação estão ilustrados resumidamente na figura 45 a seguir.

Figura 45 - Influência do processo de jigagem a seco na variabilidade dos resultados de módulo de elasticidade



(fonte: elaborado pelo autor)

Inicialmente, destaca-se os baixos valores de coeficiente de variação obtidos. Por mais que os agregados que estão presentes na composição possuam propriedades mecânicas distintas, quando analisados conjuntamente, verifica-se uma homogeneidade de comportamento em relação ao módulo de elasticidade. Isso corrobora com Correa (2014), que produziu concretos com agregados de cerâmica, argamassa e concreto separadamente, e, por fim, a mistura de todos esses materiais. O autor salienta que os concretos produzidos com um único tipo de agregado possuíam maiores coeficientes de variação que quando confeccionados com a combinação de todos eles, justificando que esse fato gera uma superposição de efeitos no módulo de elasticidade.

Como não foi possível verificar a variabilidade em relação ao RCDREF, permite-se estimar uma redução desse parâmetro após o processo de jigagem a seco. Esse comportamento foi abordado pelo trabalho de Correa (2014), que obteve redução de 14,27% para 11,15% após o a passagem pelo equipamento. No entanto, salienta-se a necessidade de novas pesquisas para confirmar essa estimativa.

## **5.3 PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO**

Os itens a seguir descrevem os valores obtidos pelo ensaio de penetração de íons cloreto, avaliando, primeiramente, os dados de forma potencial e, posteriormente, a variabilidade dos resultados obtidos. Para auxílio, similar aos itens anteriores, foi feita uma análise de variância (ANOVA) para corroborar os resultados.

### **5.3.1 Análise dos dados**

A tabela 17 apresenta os valores de carga passante referente à penetração de cloretos, em Coulomb, o desvio padrão e os coeficientes de variação para cada traço dos agregados reciclados. Destaca-se a grande porosidade dos concretos produzidos, de modo que, em quase todos os casos, atingiu-se a temperatura máxima aceita pela norma estadunidense, provocando o término do ensaio antes mesmo das últimas medições. Desse modo, os dados apresentados a seguir já estão corrigidos com os valores admissíveis no ensaio. Os anexos E, F e G apresentam todos os valores medidos.

Tabela 17 - Influência do processo de jigagem a seco na resistência à penetração de íons cloretos

AGREGADO	TRAÇO	PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO		
		MÉDIA (C)	DESVIO (C)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO
RCDREF	1:5,5	5471,35	606,92	11,09
	1:4,0	5431,64	347,01	6,39
	1:2,5	4208,50	649,00	15,42
RCDJI	1:5,5	6275,48	577,41	9,20
	1:4,0	5880,00	616,68	10,49
	1:2,5	5118,53	750,49	14,66
RCDJS	1:5,5	8478,45	255,19	3,01
	1:4,0	7556,40	284,68	3,77
	1:2,5	6121,58	174,33	2,85

(fonte: elaborado pelo autor)

Primeiramente, percebe-se que os traços mais ricos obtiveram maior resistência frente ao ataque de cloretos em relação aos traços mais pobres, como era esperado. O processo de jigagem a seco não influenciou positivamente os resultados, de modo que obteve maiores cargas passantes após a passagem pelo jig, independente da bandeja do agregado. Esses fatos foram confirmados pela análise estatística realizada (tabela 18), analisando a significância do traço e do processo de separação sobre a variável de controle.

Tabela 18 - Análise de significância do traço e processo de separação sobre a variável penetração de íons cloreto

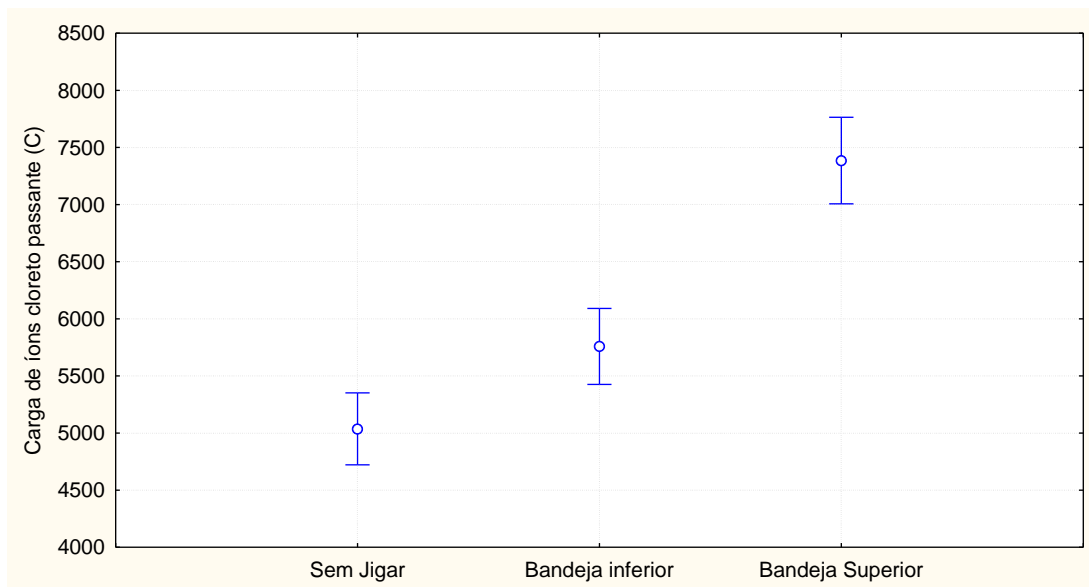
Fonte de variação	Soma quadrada	Graus de liberdade	Média quadrada	F	Significância	Influência significativa
Traço	1,4437E+07	2	7,2189E+06	25,932	0,00%	S
Processo de separação	2,7477E+07	2	1,3738E+07	49,351	0,00%	S
Traço*processo de separação	1,5273E+06	4	3,8182E+05	1,372	27,46%	NS
S - Significativo; NS - Não significativo.						

(fonte: elaborado pelo autor)

De maneira geral, o traço e o processo de separação influenciaram significativamente nos resultados de penetração de íons cloreto quando avaliados separadamente. No entanto, ao analisar a influência conjunta dos dois fatores, não se confirmou a significância. O gráfico da

figura 46 representa a influência do processo de separação na resistência dos concretos em relação à penetração de íons cloreto.

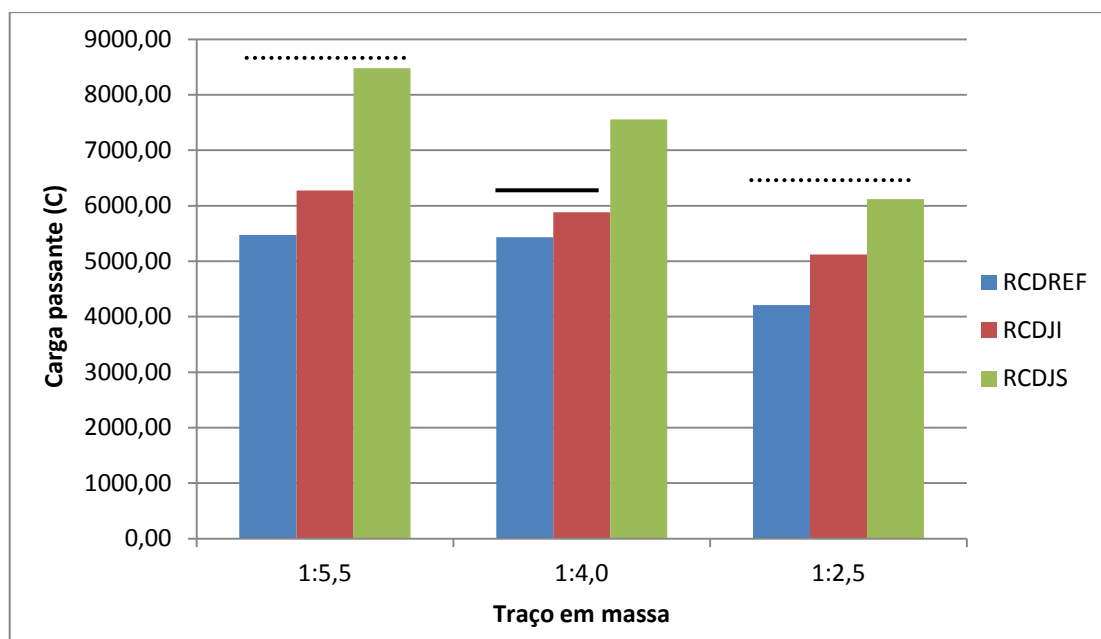
Figura 46 - Influência do processo de jigagem a seco na penetração de íons cloreto



(fonte: elaborado pelo autor)

Na figura 47 está representada a distribuição de Fischer, a fim de comparar os resultados, verificando a semelhança ou não dos valores.

Figura 47 - Distribuição de Fischer para os dados de penetração de íons cloreto



(fonte: elaborado pelo autor)

Analizando potencialmente os dados de penetração de cloretos, observa-se os elevados valores de cargas passantes, de modo que todos os concretos produzidos foram caracterizados com alta penetração de cloretos, visto que todos os valores estiveram acima de 4000 C, conforme mostra a tabela 12 no item 4.7.3. Esse comportamento ruim dos concretos produzidos com os agregados reciclados frente à penetração de agentes agressivos se dá pela própria porosidade do agregado. Segundo Olorunsogo e Padayachee<sup>9</sup> (2002) apud Cabral (2007), além dos concretos reciclados possuírem uma matriz mais porosa, o processo de reciclagem provoca fissuras nos agregados, favorecendo ainda mais a passagem de fluidos agressivos no concreto.

Troian (2010) avaliou a penetração de íons cloretos utilizando agregados reciclados de concreto e também obteve altos valores de cargas passantes. Independente das resistências dos agregados utilizados e da relação a/c, todas os concretos produzidos obtiveram valores maiores que 4000 C. A autora salienta a elevação de carga passante dos concretos reciclados em relação aos produzidos com agregado natural.

Levy (2001), embora não tenha utilizado o mesmo método de análise desta pesquisa, constatou que, ao aumentar o teor de agregados graúdos reciclados nas produções de concreto, ocorreu uma elevação de concentração de íons cloreto na ordem de 70 a 80% em relação aos agregados de referência. O autor salienta que, visto a porosidade dos agregados e consequentemente dos concretos produzidos, os resultados eram esperados.

Em relação ao jigue pneumático, verificou-se a influência negativa do processo sobre a penetração de íons cloreto, independente da bandeja do agregado. Destaca-se os altos valores de carga passante para os concretos produzidos com RCDJS, corroborando a alta porosidade da matriz verificada nos ensaios anteriores. Embora se esperasse um melhor comportamento de RCDJI em relação ao RCDREF devido ao melhor empacotamento dos agregados e, consequentemente, menos vazios na matriz do concreto, esse fato não se confirmou.

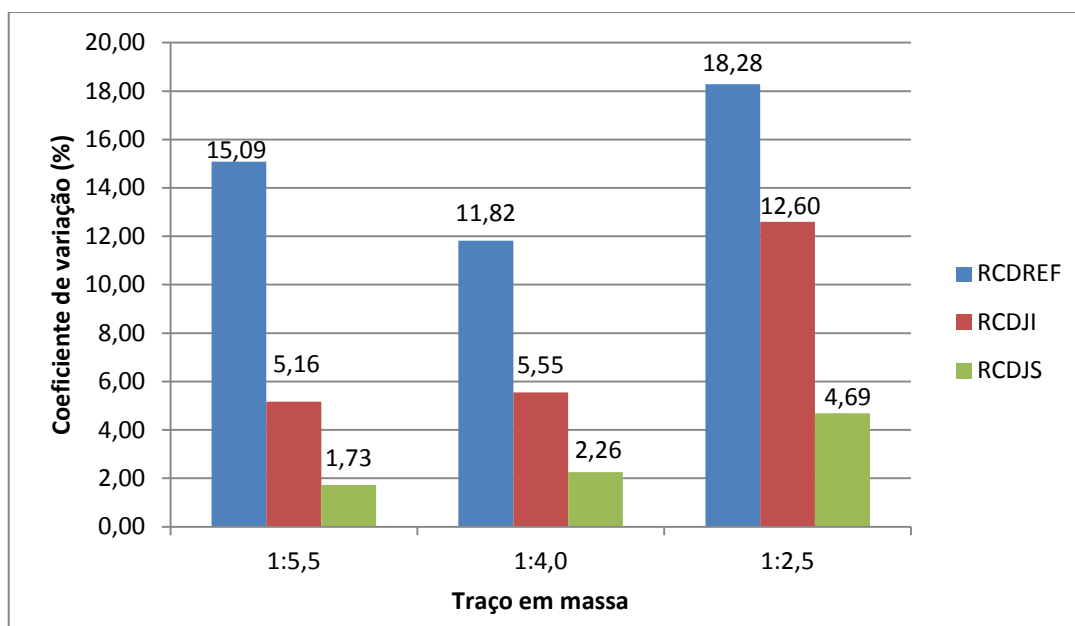
---

9 OLORUNSOGO, F. T.; PADAYACHEE, N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, p. 179-185, 2002.

### 5.3.2 Análise da influência do processo de jigagem a seco na variabilidade

A fim de comparar os valores de coeficientes de variação (já mostrados na tabela 17) em relação aos dados de penetração de íons cloreto, foi esboçado o gráfico da figura 48.

Figura 48 - Influência do processo de jigagem a seco na variabilidade do ensaio de penetração de íons cloreto



(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando a figura 48, todos os valores de coeficiente de variação diminuíram após o processamento do agregado no jigue pneumático, tanto o RCDJI quanto o RCDJS. Destaca-se a baixa variabilidade dos concretos produzidos com RCDJS que, embora tenha mostrado uma baixa resistência frente à penetração de íons cloreto, apresentou uma homogeneidade de comportamento em todos os traços realizados.

Embora os resultados mostrem uma melhora de comportamento após o processo de jigagem a seco, deve-se considerar, além da heterogeneidade de comportamento do agregado, a variabilidade do próprio ensaio.

## 5.4 EFETIVIDADE DE SEPARAÇÃO DO JIGUE PNEUMÁTICO

Para garantir a eficiência da separação das partículas no jigue pneumático, utiliza-se o parâmetro de critério de concentração (equação 5), que é a diferença entre densidades do material mais pesado e do fluido (numerador) e entre o material mais leve e o fluido



(numerador). O autor salienta que obtendo um valor de  $|cc| > 2,5$  considera-se a separação pelo equipamento mais fácil. No entanto, para valores menores que 1,5, o processo se torna menos eficiente (TRABALHO NÃO PUBLICADO<sup>10</sup>).

$$cc = \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_l - \rho_f} \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

$cc$  = critério de concentração;

$\rho_p$  = densidade aparente do material mais pesado;

$\rho_f$  = densidade aparente do fluido;

$\rho_l$  = densidade aparente do material mais leve.

Portanto, devido aos resultados apresentados nos itens acima, optou-se por avaliar o critério de concentração do material processado no jigge pneumático. Assim, calculou-se a densidade aparente de alguns componentes do agregado reciclado coletado (tabela 19) e adotou-se uma densidade aparente do ar como 0,0121 kg/dm<sup>3</sup>.

Tabela 19 - Densidade aparente de alguns componentes do RCD coletado

Agregado	Densidade aparente (kg/dm <sup>3</sup> )
Concreto	1,32
Cerâmica	0,89
Arenito	1,17
Argamassa	1,11

(fonte: elaborado pelo autor)

Utilizando o concreto como material mais pesado e a cerâmica como o mais leve, encontrou-se um valor de  $cc$  igual a 1,49. Desse modo, verificou-se a falta de sensibilidade do equipamento para materiais com densidades tão próximas, explicando a ineficiência do processo de jigagem a seco para separar o material coletado. Esse fato já fora observado por

<sup>10</sup>Páginas 5 e 6 **All air S-500 - modo de operação** criado por Weslei Monteiro Ambrós em maio de 2014, Porto Alegre

Correa (2014) que, ao jigar, obteve valores de CC 1,25 e 1,01 para suas amostras de agregado graúdo reciclado.

Além disso, destaca-se a influência da granulometria no processo de jigagem a seco, uma vez que foi utilizada uma faixa granulométrica muito extensa, da peneira 4,8 mm a 25 mm. Esse fato fez com que os grãos menores se encaixassem nos vazios dos grãos maiores nas bandejas mais abaixo do equipamento, de modo que, durante o processo, notava-se os agregados menores e menos densos presos pelos agregados maiores, prejudicando a separação densitária do jig. Houve, então, uma compactação dos grãos, que pode ser confirmada no ensaio de granulometria (item 4.5.1), onde o RCDJI obteve uma distribuição mais contínua que os demais, e o RCDJS, por sua vez, apresentou partículas mais grosseiras.

Sampaio e Tavares (2005) destacam essa interferência de faixas granulométricas muito extensas, de modo que para partículas mais grosseiras necessita uma velocidade de ar maior no jig pneumático. Porém, essa mudança de característica no equipamento gera um excesso de turbulência para grãos menores, prejudicando a separação do agregado. Correa (2014) salienta a influência da granulometria e confirmou melhor eficiência do processo de jigagem a seco utilizando uma faixa de agregado entre 12,7 mm e 19 mm quando comparada a faixa 4,75 mm e 19 mm.

Outra questão a ser abordada é a forma do agregado reciclado utilizado, a qual prejudicou a estratificação no jig pneumático. Conforme mostra o item 4.5.2, a forma do RCDREF é da ordem de 3,15, valor relativamente alto quando consultada a norma brasileira. Sampaio e Tavares (2005) afirmam que grãos muito lamelares afetam a separação das partículas mais leves, independente da densidade das mesmas.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho tinha como objetivo principal viabilizar a utilização de RCD como agregados, separando-os de forma densitária através do processo de jigagem a seco, com propósito de diminuir a variabilidade de comportamento desses materiais em misturas de concreto. A partir disso, coletou-se um material diretamente de uma usina de reciclagem, levando para o laboratório, a fim de estudar o comportamento do agregado antes e após o processamento no jigue pneumático, avaliando a sua caracterização e sua influência no desempenho mecânico e na durabilidade de concretos.

Destaca-se que todas as conclusões desta pesquisa não devem ser tomadas como definitivas, uma vez que as mesmas representam informações referentes ao material coletado, às quantidades e proporções escolhidas e às técnicas de produção utilizadas. Salienta-se a necessidade de realizar novas pesquisas a fim de confirmar ou não os resultados deste trabalho.

### 6.1 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e das discussões realizadas nos capítulos anteriores, é possível concluir o seguinte:

**a) em relação ao processo de jigagem a seco,**

- o processo de separação por jigagem a seco não se mostrou eficiente na separação densitária dos agregados graúdos reciclados, de modo que se encontravam os mesmos tipos de grãos em todas as camadas de estratificação do equipamento após o ensaio;
- o fato de o material coletado possuir densidades aparentes muito próximas prejudicou o processamento no jigue pneumático;
- os agregados reciclados obtiveram um critério de concentração igual a 1,49, caracterizando a separação dos agregados no jigue pneumático difícil;
- os agregados provenientes da bandeja inferior do jigue tiveram comportamentos diferentes em relação aos da bandeja superior em quase todos os parâmetros analisados neste trabalho.

**b) em relação à caracterização dos agregados reciclados**

- o processo de jigagem a seco influenciou diretamente na granulometria dos agregados, de modo que os grãos mais grosseiros se depositaram nas bandejas

superiores do equipamento, enquanto a bandeja inferior era composta por partículas com tamanhos mais bem distribuídos;

- esse fato, portanto, acarretou em um aumento no módulo de finura dos grãos de RCDJS e em uma diminuição nas partículas de RCDJI;
- independente do processo de jigagem a seco, nenhuma das curvas dos agregados graúdos reciclados estavam inclusas na zona ótima estabelecida pela norma brasileira;
- não se comprovou diferenças nos valores de índice de forma após o processo de jigagem. Destaca-se a variabilidade de grãos, não sendo possível avaliar este comportamento apenas através da média das duas amostras feitas no ensaio;
- de maneira geral, o jigue pneumático não influenciou de forma expressiva na composição do agregado coletado. Os grãos de concreto, material mais denso da amostra, manteve seu percentual de referência em ambas camadas de estratificação analisadas. Os materiais de cerâmica vermelha, por serem menos densos, estiveram mais presentes na bandeja superior do equipamento;
- a maior diferença de composição foi nas rochas do material, havendo uma queda de aproximadamente 10% na bandeja superior do equipamento. Além disso, 72% deste material, que representa um aumento de 6% em relação ao agregado de referência, é composto por arenito. Em relação à bandeja inferior, houve um aumento de 3,81% nas rochas em relação ao RCD de referência. Somado a isso, obteve-se uma queda de 9% no percentual de arenito;
- o processo de jigagem a seco influenciou na massa unitária dos agregados processados, aumentando em 6,3% o valor para RCDJI e diminuindo em 4,17% para RCDJS em relação ao RCDREF;
- quanto à massa específica, os agregados jigados não obtiveram diferenças expressivas em relação ao de referência;
- em relação à absorção, obteve-se uma queda de 5,79% e 3% dos RCDJI e RCDJS quando comparados ao RCDREF, respectivamente.

#### **c) em relação ao ensaio de compressão axial**

- todos os concretos reciclados, com agregados jigados ou não, tiveram resistências crescentes do traço pobre ao rico, como era esperado;
- com base na análise estatística, o processo de separação por jigagem a seco influenciou significativamente nos resultados de resistência à compressão axial, havendo um ligeiro aumento nos concretos produzidos com RCDJI e um decréscimo de aproximadamente 24% do RCDJS em relação ao RCDREF;
- os concretos foram produzidos com altos consumos de cimento se analisadas as resistências atingidas. Esse comportamento evidencia a fragilidade dos agregados coletados;
- o processo de jigagem a seco influenciou negativamente na variabilidade dos resultados de resistência à compressão. Com exceção do traço 1:5,5, obteve-se um aumento nos valores de coeficiente de variação após o processamento dos agregados.

**d) em relação ao ensaio de módulo de elasticidade**

- os concretos produzidos com RCDJI obtiveram módulos de elasticidade até 33% maiores que os com RCDJS, evidenciando ainda mais a diferença de agregados nas camadas de estratificação;
- a partir da análise estatística, pode-se concluir que o traço e o processo de jigagem a seco influenciaram significativamente nos valores de módulo de elasticidade. O mesmo não ocorreu quando foi avaliada a influência conjunta dos dois fatores;
- verificou-se uma proximidade nos valores de módulo de elasticidade entre os traços 1:4,0 e 1:5,5, tanto no RCDJI quanto no RCDJS, de modo que, mesmo ea aumentando a resistência da argamassa, o módulo de elasticidade se limitava na resistência do agregado graúdo reciclado;
- visto os baixos valores de módulo de elasticidade atingidos, confirmou-se ainda mais a fragilidade dos materiais reciclados que foram coletados, uma vez que esse parâmetro do concreto está diretamente relacionado aos agregados graúdos;
- os concretos produzidos com RCDJS obtiveram menores coeficientes de variação em todos os traços em relação aos com RCDJI.

**e) em relação ao ensaio de penetração de íons cloreto**

- os concretos mais ricos obtiveram maiores resistências frente a penetração de íons cloreto, enquanto os mais pobres foram os mais atingidos, como era esperado;
- o processo de jigagem a seco influenciou negativamente em relação ao ataque de íons cloretos nos concretos, havendo um aumento de até 21% de carga passante para o RCDJI e 55% para RCDJS;
- independente do processo de separação, todos os concretos reciclados obtiveram alta penetração de íons cloretos, confirmando ainda mais a fragilidade do agregado coletado;
- a variabilidade de resultados de penetração de íons cloretos reduziu potencialmente de 15,42% para 2,85% nos concretos produzidos com RCDJS em relação ao RCDREF, demonstrando a eficiência do processo de jigagem a seco nessa propriedade quando analisada essa camada de estratificação;
- com exceção do traço 1:4,0, os concretos produzidos com RCDJI obtiveram um comportamento muito semelhante ao RCDREF, diminuindo apenas 1,89% e 0,76% para os traços 1:5,5 e 1:2,5, respectivamente.

De maneira geral, com base nos resultados desta pesquisa, o processo de jigagem a seco não diminuiu a variabilidade dos resultados referentes às propriedades dos concretos reciclados produzidos. Acredita-se que os resultados foram influenciados pela fragilidade dos agregados coletados, provenientes de uma usina de reciclagem onde a coleta é feita em edificações unifamiliar com pouca solicitação de carga. Esse fato determinou a fragilidade de materiais

possivelmente mais densos, como os concretos, e, portanto, a proximidade de densidades dos agregados presentes na composição. Consequentemente, esse fator influenciou na eficiência do processo de jigagem a seco.

Além disso, a larga faixa granulométrica também foi considerada uma dificuldade para uma melhor estratificação no jigue pneumático. Ocorreu que os grãos menores se encaixaram nos vazios deixados pelos grãos maiores, havendo uma certa compactação dos materiais. Isso resultou em partículas mais distribuídas na bandeja inferior do equipamento, enquanto na camada superior se encontrava grãos mais grosseiros. Acredita-se, portanto, que a distribuição granulométrica influenciou nas propriedades mecânicas dos concretos produzidos com agregados jigados, visto que essa característica determina um melhor ou pior empacotamento da matriz.

Concluindo, entende-se por esse trabalho um modelo inovador sobre o tema, visto que era necessário avaliar o comportamento do jigue pneumático quando utilizado um material retirado diretamente de uma usina de reciclagem, de modo a tentar viabilizar o seu uso em escalas além do ambiente laboratorial.

## **6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Para complementar os resultados e avaliar alguns pontos que não foram contemplados nesta pesquisa, sugere-se alguns temas para trabalhos futuros:

- a) separar os agregados reciclados em faixas granulométricas mais reduzidas antes do processamento no jigue pneumático;
- b) avaliar a influência do processo de jigagem a seco em outros ensaios de durabilidade, como absorção e carbonatação;
- c) utilizar agregados reciclados com fontes originadas de cidades grandes, onde tenha estruturas mais solicitadas;
- d) avaliar outros parâmetros do jigue pneumático para executar o processamento dos agregados, de modo a encontrar uma configuração ótima para o processo.

## REFERÊNCIAS

AMADEI, D. I. B.; PEREIRA, J. A.; SOUZA, A. de S.; MENEGUETTI, K. S. **A questão dos resíduos de construção civil: um breve estado da arte**. Revista Nupem, v. 3, n. 5, p. 185-199, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1202**: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. West Conshohocken, USA, 2012

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. **Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade**. IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, p. 1613-1624, 2002.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M.; ULSEN, C., KAHN, H. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos**. Conferência Latino Americana De Construção Sustentável, 2004.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. 215f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 27**: agregados - redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR 15113**: resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - aterros - diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 7809**: agregado graúdo - determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - método de ensaio, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45:** determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739:** concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211:** agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52:** agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53:** agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009

\_\_\_\_\_. **NBR 8522:** concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. **Usinas Mapeadas no Brasil**. Disponível em: < <http://www.abrecon.org.br/quem-somos/>>. Acesso em 20 mai. 2017.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto - influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. 199f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Diário Oficial da república Federativa do Brasil. Brasília, DF, 26 jul. 2000. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>. Acesso em 21 mai. 2017

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 254f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

CARNEIRO, F. P. **Diagnóstico e ações da atual situação dos resíduos de construção e demolição na cidade do Recife**. 2005. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.

CARRIJO, P. M.; FIGUEIREDO, A. D. de. **Análise do desempenho mecânico de concretos com agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição reciclados separados por densidade**. São Paulo: EPUSP, 2005. Boletim Técnico PCC n. 410, 2005.



CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 307**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, DF, 2002.

CORDEIRO, L. de N. P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto**. 2013. 127f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

CORRÊA, A. A. B. **Propriedades mecânicas de concretos com agregados reciclados: estudo de redução da variabilidade em concretos utilizando agregados submetidos à separação por jigagem a seco**. 2014. 97f. Trabalho de Diplomação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

CORRÊA, B. C.; CURSINO, D.; SILVA, G. **Viabilidade de Implantação de uma usina de reciclagem da construção civil na cidade de São José dos Campos/SP**. São José dos Campos: Encontro Latino Americano de Pós-Graduação, 2009.

FORMOSO, C. T.; DE CESARE, C. M.; LANTELME, E.M.V.; SOIBELMAN, L. **As perdas na construção civil: conceitos, classificações e seu papel na melhoria do setor**. Brasil - Porto Alegre, RS. Egatea: Revista da Escola de Engenharia, semestral v.25, n.3, p. 45-53, il. 1996.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil**. IBRACON (2 Vol.). São Paulo, 2007.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

JADOVSKI, I. **Diretrizes técnicas e econômicas para usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição**. 2005. 178f. Trabalho de Diplomação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção**. Seminário Reciclagem de Resíduos Sólidos Domésticos, 2000.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. São Paulo. 194f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2001.

LIMA, F. M. de S. **A formação da mineração urbana no Brasil: reciclagem de RCD e a produção de agregados**. 2013. 154f. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2013.

LINTZ, R. C. C. JACINTHO, A .E. P .G.De A.; PIMENTEL, L. L.; BARBOSA, L. A. G. **Estudo do reaproveitamento de resíduos de construção em concretos empregados na fabricação de blocos**. RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal, v. 5, n. 2, 2011.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto.** 2007. 180f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MALYSZ, G. N. **Estudo da influência da jigagem nas propriedades do concreto com agregado reciclado.** 2018. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, p. 37-272, 1994.

MIRANDA, L. F. R. **Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos Classe A da construção civil.** 2005. 441f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C. CARELI, E. D. **A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008.** Ambiente Construído, v. 9, n. 1, p. 57-71, 2009.

MORAND, F. G. **ESTUDO DAS PRINCIPAIS APLICAÇÕES DE RESÍDUOS DE OBRA COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.** 2016. 91 f. Projeto de graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2016.

MOREIRA, L. H. H. **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural.** 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2010.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.; **Tecnologia do concreto.** Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, p. 41-277, 2013.

BRASIL. LEI FEDERAL Nº 12.305. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS),** Brasil, v. 2, 2010.

ROHDEN, A. B. **Contribuição aos métodos de dosagem de concreto de alta resistência a partir do entendimento da influência dos agregados na mistura.** 2015. 177f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

SÁNCHEZ, M. de J. **Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural.** 2004.505f. Tese (Doutoramento em Construção) - Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Madrid, España, 2004.

SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. M. **Beneficiamento Gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade.** Porto Alegre: Editora da UFRGS, p. 271-498, 2005.

SAMPAIO, C. H.; CAZACLIU, B. G.; MILTZAREK, G.L.; PARANHOS, R.; HUCHET, F.; PETTER, C.O.; AMBRÓS, W.M., LIENDO, A.; OLIVEIRA, M. L. S. **Concentração de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) através de jigagem a ar**. XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa Poços de Caldas-MG, 2015.

SENISSE, J. A. de L. **Estudo do efeito do agregado cerâmico com diferentes porosidades no comportamento mecânico e de retração livre e restringida de concretos, visando o uso de resíduos de construção e demolição como agente de cura interna**. 2015.296 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Gestão ambiental de resíduos da construção civil - avanços institucionais e melhorias técnicas**. 2015.

SILVA, A. B. da; MACIEL, J. C. S. **Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. REVISTA IGAPÓ-Revista De Educação Ciência E Tecnologia Do IFAM, v. 3, 2014.

SILVA, C. S. de S. da. **Diagnóstico ambiental de áreas de disposição de resíduos da construção e demolição em Porto Alegre**. 2014.117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, Rio Grande do Sul, 2014.

SOUZA, E.; MARINHO, G.; DEGRAFF, H.; SANTOS, L.; MIRANDA, L.; VOGT, V. **Avaliação da influência do tipo de britador nas propriedades de agregados reciclados graúdos**. São Paulo, SP. XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2016.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto**. 2010. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Sinos, São Leopoldo, 2010.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2003.150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ZORDAN, S. E. **Utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. 1997. 140 f. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 1997.

ZORTEA, F. **Características mecânicas de concretos produzidos com materiais cerâmicos reciclados: estudo da redução da variabilidade usando separação dos agregados por densidade**. 2014. 95f. Trabalho de Diplomação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

**ZORTEA, J. Agregados reciclados de resíduos de construção e demolição: remoção de contaminantes por separação por densidade para utilização em concreto.** 2014. 105f. Trabalho de Diplomação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

## **ANEXO A - DADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL RCDREF**

TRAÇO	CP	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Dmédio (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hmédio (mm)	Carga (kN)	Tensão (MPa)	H/D	Fator de correção	Tensão corrigida (MPa)
m=5,5	CP1	99,38	99,75	99,76	99,63	192,54	192,61	192,42	192,52	111,60	14,32	1,93	0,995	14,24
	CP2	100,36	100,75	99,35	100,15	193,83	193,68	193,54	193,68	115,00	14,60	1,93	0,995	14,52
	CP3	100,24	100,48	100,36	100,36	192,32	193,43	193,08	192,94	128,40	16,23	1,92	0,994	16,13
	CP4	99,48	100,19	99,86	99,84	194,05	193,18	194,04	193,76	121,47	15,51	1,94	0,995	15,44
	CP6	101,07	100,06	100,51	100,55	194,05	194,03	193,45	193,84	109,07	13,74	1,93	0,994	13,66
	CP7	100,89	100,88	98,95	100,24	193,77	193,39	193,82	193,66	117,81	14,93	1,93	0,995	14,85
m=4,0	CP1	99,43	100,38	99,51	99,77	194,95	195,31	195,38	195,21	147,00	18,80	1,96	0,997	18,74
	CP2	100,00	99,77	99,68	99,82	195,35	194,60	194,76	194,90	141,60	18,10	1,95	0,996	18,03
	CP3	100,68	100,74	100,29	100,57	194,56	194,27	194,21	194,35	153,60	19,34	1,93	0,995	19,23
	CP4	101,00	100,11	100,26	100,46	194,20	194,22	194,31	194,24	160,12	20,20	1,93	0,995	20,09
	CP5	99,18	99,39	100,02	99,53	193,95	194,48	194,22	194,22	151,55	19,48	1,95	0,996	19,40
	CP6	100,61	99,00	100,10	99,90	194,77	194,33	194,57	194,56	158,57	20,23	1,95	0,996	20,14
m=2,5	CP1	101,09	100,47	100,57	100,71	196,67	196,49	196,32	196,49	175,60	22,04	1,95	0,996	21,96
	CP2	100,67	99,92	100,77	100,45	196,03	196,39	196,39	196,27	175,60	22,16	1,95	0,996	22,07
	CP3	100,03	100,13	100,06	100,07	197,89	197,74	197,48	197,70	187,90	23,89	1,98	0,998	23,84
	CP4	98,90	101,00	99,36	99,75	196,53	197,01	197,44	196,99	172,99	22,13	1,97	0,998	22,09
	CP5	100,71	100,26	99,86	100,28	195,39	195,80	195,52	195,57	178,64	22,62	1,95	0,996	22,53
	CP6	100,62	100,25	99,71	100,19	195,16	195,29	195,61	195,35	185,65	23,55	1,95	0,996	23,45

## **ANEXO B - DADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL RCDRJI**

TRAÇO	CP	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Dmédio (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hmédio (mm)	Carga (KN)	Tensão Real (Mpa)	H/D	Fator de correção	Tensão corrigida (Mpa)
<b>m = 5,5</b>	CP1	99,69	99,78	100,21	99,89	190,32	190,25	190,26	190,28	117,40	14,98	1,90	0,99	14,87
	CP2	100,60	100,83	99,60	100,34	188,46	189,30	188,42	188,73	120,20	15,20	1,88	0,99	15,05
	CP3	100,99	100,00	100,41	100,47	192,60	192,69	192,75	192,68	133,20	16,80	1,92	0,99	16,69
	CP4	99,82	99,95	100,65	100,14	193,06	193,22	193,31	193,20	131,67	16,72	1,93	0,99	16,62
	CP5	99,87	99,62	99,53	99,67	191,74	191,95	191,97	191,89	113,24	14,51	1,93	0,99	14,43
	CP6	100,69	100,02	99,69	100,13	194,07	194,07	194,33	194,16	125,30	15,91	1,94	1,00	15,83
<b>m = 4,0</b>	CP1	100,35	99,95	98,91	99,74	194,40	194,22	194,38	194,33	164,80	21,09	1,95	1,00	21,01
	CP2	99,92	99,75	99,81	99,83	192,41	192,52	192,27	192,40	168,90	21,58	1,93	0,99	21,45
	CP3	98,98	98,43	99,36	98,92	197,20	197,11	197,16	197,16	158,50	20,62	1,99	1,00	20,61
	CP4	98,53	99,39	99,91	99,28	195,96	195,79	195,88	195,88	144,99	18,73	1,97	1,00	18,69
	CP5	99,55	99,92	99,98	99,82	190,67	190,66	190,81	190,71	151,35	19,34	1,91	0,99	19,20
	CP6	98,25	100,27	100,62	99,71	196,27	196,50	196,60	196,46	157,07	20,11	1,97	1,00	20,07
<b>m = 2,5</b>	CP1	99,82	99,66	99,67	99,72	196,48	196,68	196,69	196,62	167,60	21,46	1,97	1,00	21,41
	CP2	100,47	99,93	100,44	100,28	196,27	196,36	196,45	196,36	176,30	22,32	1,96	1,00	22,25
	CP3	99,59	101,12	99,98	100,23	191,81	192,61	191,97	192,13	171,10	21,69	1,92	0,99	21,54
	CP4	99,21	100,38	100,96	100,18	191,12	191,34	191,42	191,29	179,81	22,81	1,91	0,99	22,65
	CP5	99,11	99,44	100,54	99,70	195,60	195,71	195,68	195,66	185,13	23,72	1,96	1,00	23,64
	CP6	100,89	99,83	99,58	100,10	195,75	195,88	196,39	196,01	147,26	18,71	1,96	1,00	25,61



## **ANEXO C - DADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL RCDRJS**

TRAÇO	CP	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Dmédio (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hmédio (mm)	Carga (KN)	Tensão Real (Mpa)	H/D	Fator de correção	Tensão corrigida (Mpa)
TRAÇO m=5,5	CP1	99,54	101,76	100,58	100,63	190,95	191,47	190,62	191,01	123,10	15,48	1,90	0,992	15,35
	CP2	100,40	99,25	100,81	100,15	196,18	196,22	195,63	196,01	104,00	13,20	1,96	0,997	13,16
	CP3	99,65	89,75	100,06	96,49	190,56	190,47	190,92	190,65	90,70	12,40	1,98	0,998	12,38
	CP4	100,29	99,75	99,85	99,96	192,63	192,19	192,31	192,38	109,30	13,93	1,92	0,994	13,84
	CP5	99,98	99,72	100,06	99,92	192,34	192,31	191,65	192,10	105,04	13,40	1,92	0,994	13,31
	CP6	100,78	100,48	99,05	100,10	191,23	191,17	191,07	191,16	108,22	13,75	1,91	0,993	13,65
	CP7	99,47	100,83	99,52	99,94	192,33	191,66	191,52	191,84	116,99	14,91	1,92	0,994	14,82
TRAÇO m=4,0	CP1	99,73	99,44	101,65	100,27	194,36	194,06	194,06	194,16	142,10	17,99	1,94	0,995	17,90
	CP2	100,31	100,36	99,90	100,19	196,71	196,92	196,24	196,62	106,70	13,53	1,96	0,997	13,49
	CP3	99,59	100,29	99,96	99,95	198,19	197,72	197,60	197,84	150,40	19,17	1,98	0,998	19,14
	CP4	100,08	99,71	100,01	99,93	197,33	197,25	197,59	197,39	135,70	17,30	1,98	0,998	17,27
	CP5	100,44	100,73	100,15	100,44	194,38	194,40	194,33	194,37	139,00	17,54	1,94	0,995	17,45
	CP6	100,79	100,55	100,17	100,50	197,92	197,91	197,63	197,82	134,72	16,98	1,97	0,997	16,94
	CP7	99,72	99,50	100,16	99,79	198,81	198,70	198,91	198,81	119,85	15,32	1,99	0,999	15,31
	CP8	100,45	100,52	100,96	100,64	194,26	194,64	194,59	194,50	142,78	17,95	1,93	0,995	17,85
TRAÇO m=2,5	CP1	99,30	100,81	100,71	100,27	195,58	195,46	195,48	195,51	176,40	22,34	1,95	0,996	22,25
	CP2	100,44	99,92	100,31	100,22	195,77	196,25	195,74	195,92	144,60	18,33	1,95	0,996	18,26
	CP3	99,45	100,12	99,61	99,73	194,67	195,04	195,06	194,92	142,60	18,26	1,95	0,996	18,19
	CP4	99,80	99,91	100,34	100,02	193,47	193,33	193,40	193,40	130,40	16,60	1,93	0,995	16,51
	CP5	101,28	99,32	99,51	100,04	194,15	194,20	194,78	194,38	140,40	17,86	1,94	0,995	17,78
	CP6	99,41	100,56	101,00	100,32	99,18	101,23	100,77	100,39	142,52	18,03	1,00	0,920	16,59
	CP7	99,79	100,77	100,04	100,20	194,23	194,25	194,73	194,40	145,64	18,47	1,94	0,995	18,38
	CP8	99,89	100,76	99,29	99,98	195,51	195,46	195,43	195,47	165,19	21,04	1,96	0,996	20,97

## **ANEXO D - DADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE**

Agregado	Traço	CP	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Dmédio (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hmédio (mm)	Ruptura Prevista (KN)	E (Gpa)	Média (Gpa)	Dispersão
RCDJI	TRAÇO m=5,5	CP4	99,82	99,95	100,65	100,14	193,06	193,22	193,31	193,20	123,60	17,80	17,30	-2,89%
		CP5	99,87	99,62	99,53	99,67	191,74	191,95	191,97	191,89	123,60	16,80	17,30	2,89%
		CP6	100,69	100,02	99,69	100,13	194,07	194,07	194,33	194,16	123,60	14,4*	17,30	-
	TRAÇO m=4,0	CP4	98,53	99,39	99,91	99,28	195,96	195,79	195,88	195,88	164,07	19,43	19,84	2,08%
		CP5	99,55	99,92	99,98	99,82	190,67	190,66	190,81	190,71	164,07	20,50	19,84	-3,31%
		CP6	98,25	100,27	100,62	99,71	196,27	196,50	196,60	196,46	164,07	19,60	19,84	1,23%
	TRAÇO m=2,5	CP4	99,21	100,38	100,96	100,18	191,12	191,34	191,42	191,29	171,67	21,15	20,38	-3,80%
		CP5	99,11	99,44	100,54	99,70	195,60	195,71	195,68	195,66	171,67	19,60	20,38	3,80%
		CP6	100,89	99,83	99,58	100,10	195,75	195,88	196,39	196,01	171,67	15,9*	20,38	-
RCDJS	TRAÇO m=5,5	CP6	99,98	99,72	100,06	99,92	192,34	192,31	191,65	192,10	106,78	13,30	13,00	-2,31%
		CP7	100,78	100,48	99,05	100,10	191,23	191,17	191,07	191,16	106,78	12,70	13,00	2,31%
		CP8	99,47	100,83	99,52	99,94	192,33	191,66	191,52	191,84	106,78	14,1*	13,00	-
	TRAÇO m=4,0	CP6	100,79	100,55	100,17	100,50	197,92	197,91	197,63	197,82	134,78	15,2*	16,55	-
		CP7	99,72	99,50	100,16	99,79	198,81	198,70	198,91	198,81	134,78	16,40	16,55	0,91%
		CP8	100,45	100,52	100,96	100,64	194,26	194,64	194,59	194,50	134,78	16,70	16,55	-0,91%
	TRAÇO m=2,5	CP6	99,41	100,56	101,00	100,32	99,18	101,23	100,77	100,39	146,88	16,20	16,45	1,52%
		CP7	99,79	100,77	100,04	100,20	194,23	194,25	194,73	194,40	146,88	9,4*	16,45	-
		CP8	99,89	100,76	99,29	99,98	195,51	195,46	195,43	195,47	146,88	16,70	16,45	-1,52%

## **ANEXO E - DADOS DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO RCDREF**

ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS - ASTM C 1202															
Primeiro Ensaio															
HORAS		15:37	16:07	16:37	17:07	17:37	18:07	18:37	19:07	19:37	20:07	20:37	21:07	21:37	Carga passante (Coulombs)
PERÍODO LEITURA		00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	
1	1:5,5 - 1.1	171,11	216	249	288	324	359	385	421	446	457	454	441	421	5403,70
2	1:5,5 - 1.2	174,62	232	288	365	444	532	602	648	657	656	648	529	482	6348,26
3	1:5,5 - 2.1	171,61	218	260	310	352	398	440	477	498	491	471	447	422	5021,65
4	1:5,5 - 2.2	166,79	201	239	269	303	337	367	400	423	435	434	427	411	5111,81
5	1:4,0 - 1.1	151,42	172,48	190,49	218	241	266	284	302	317	329	336	336	332	5219,42
6	1:4,0 - 1.2	145,14	175,31	193,56	219	242	265	284	300	318	333	342	345	345	5871,49

Segundo Ensaio															Carga passante (Coulombs)
HORAS		12:50	13:20	13:50	14:20	14:50	15:20	15:50	16:20	16:50	17:20	17:50	18:20	18:50	
PERÍODO LEITURA		00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	
1	1:4,0 - 2.1	166,24	196,86	223	249	276	307	331	352	369	384	391	390	386	5339,66
2	1:4,0 - 2.2	174,43	215	251	289	329	360	388	404	412	414	408	396	382	5295,99
3	1:2,5 - 1.1	150,33	156,73	165,62	176,68	186,86	196,49	207	216	223	229	232	232	230	3924,98
4	1:2,5 - 1.2	185,21	203	224	242	256	265	274	281	283	287	288	287	281	5110,39
5	1:2,5 - 2.1	137,32	141,59	146,46	152,02	158,67	162,51	166,29	173,06	181,32	182,33	186,03	186,23	190,18	3600,47
6	1:2,5 - 2.2	155,47	165,37	178,59	191,62	208	214	224	232	237	241	242	242	240	4198,17

## **ANEXO F - DADOS DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO RCDJI**

ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS - ASTM C 1202															Carga passante (Coulombs)
Primeiro Ensaio															
HORAS		10:57	11:27	11:57	12:27	12:57	13:27	13:57	14:27	14:57	15:27	15:57	16:27	16:57	
PERÍODO LEITURA		00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	
1	1:5,5 - 1.1	260	293	331	358	378	389	412	425	445	446	444	435	430	6091,20
2	1:5,5 - 1.2	274	308	345	368	385	402	428	448	458	460	452	448	440	6316,20
3	1:5,5 - 2.1	253	281	315	331	349	365	378	395	401	402	399	384	380	5656,50
4	1:5,5 - 2.2	246	285	321	340	368	389	409	412	420	421	422	418	409	7038,00
5	1:4,0 - 1.1	251	279	295	309	322	345	358	369	384	392	395	394	390	6432,30
6	1:4,0 - 1.2	215	255	270	291	312	342	357	372	391	399	398	397	392	5214,60

Segundo Ensaio															
HORAS		10:52	11:22	11:52	12:22	12:52	13:22	13:52	14:22	14:52	15:22	15:52	16:22	16:52	Carga passante (Coulombs)
PERÍODO LEITURA		00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	
1	1:4,0 - 2.1	216	247	265	311	364	411	444	471	476	465	441	400	351	5993,10
2	1:4,0 - 2.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3	1:2,5 - 1.1	200	225	272	327	378	420	454	486	511	513	483	429	369	6173,10
4	1:2,5 - 1.2	182	190	228	276	318	353	371	397	418	420	381	351	322	5133,60
5	1:2,5 - 2.1	177	188	212	248	280	308	325	343	350	351	344	329	307	4532,40
6	1:2,5 - 2.2	190	210	250	300	350	380	390	400	400	390	380	380	370	4635,00



## **ANEXO G - DADOS DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO RCDJS**

ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS - ASTM C 1202															
Primeiro Ensaio															
HORAS		07:14	07:44	08:14	08:44	09:14	09:44	10:14	10:44	11:14	11:44	12:14	12:44	13:14	Carga passante (Coulombs)
PERÍODO LEITURA		00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	
1	1:5,5 - 1.1	161	259	320	382	457	536	595	620	623	625	626	624	615	8658,90
2	1:5,5 - 1.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3	1:5,5 - 2.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
4	1:5,5 - 2.2	160	196	263	329	394	474	562	620	658	689	690	685	640	8298,00
5	1:4,0 - 1.1	161	193	243	297	348	404	471	549	616	649	656	614	533	7521,30
6	1:4,0 - 1.2	164	190	238	289	335	383	464	525	593	631	641	630	545	7290,90

Segundo Ensaio															Carga passante (Coulombs)
HORAS		07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	
PERÍODO LEITURA		00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	
1	1:4,0 - 2.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
2	1:4,0 - 2.2	200	257	310	366	409	452	503	531	567	576	588	580	562	7857,00
3	1:2,5 - 1.1	184	218	262	297	308	339	381	405	419	435	436	431	421	6073,20
4	1:2,5 - 1.2	179	222	276	328	360	398	443	461	473	481	478	464	440	5923,80
5	1:2,5 - 2.1	184	237	286	328	354	376	394	403	414	425	430	422	404	6343,20
6	1:2,5 - 2.2	175	228	271	305	335	362	382	394	406	425	438	430	411	6146,10